

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Sistema base para monitorização de parâmetros de máquinas e processos produtivos

Rui Daniel do Amaral Alves

PARA APRECIÇÃO POR JÚRI

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Paulo José Lopes Machado Portugal

1 de Setembro de 2017

Resumo

O presente documento tem como intuito apresentar o sistema base de monitorização desenvolvido para uma fábrica, em tempo real, procedendo-se à supervisão de um parâmetro de uma máquina. Escolheu-se para este fim uma máquina de desmineralização de água, onde o parâmetro definido para monitorização foi a condutividade elétrica. O requisito mais importante deste trabalho foi criar um sistema facilmente expansível, ou seja, o sistema proposto permite que se adicionem mais máquinas e parâmetros de forma simples. O objetivo final, para a empresa, será ter todas as máquinas presentes na fábrica monitorizadas simultaneamente e em tempo real. A observação da evolução do parâmetro escolhido, isto é, da condutividade elétrica, que se reveste de grande importância para a averiguação da qualidade da água desmineralizada, foi realizado através de um sistema de controlo da qualidade, onde foram utilizadas cartas de controlo da qualidade e técnicas de extrapolação. Através das cartas de controlo de qualidade obteve-se um método sólido de monitorização em tempo real do processo e o intuito das técnicas de extrapolação foi prever possíveis falhas e manutenções necessárias na máquina de desmineralização, para desta forma serem reduzidos custos desnecessários, mantendo um bom funcionamento do sistema em questão, de forma fiável, robusta e sem custos adicionais para a empresa.

Abstract

The purpose of this paper is to create a monitoring system for a real-time plant, with the supervision of a parameter of a machine. A water demineralization machine was chosen for this purpose, where the parameter defined for monitoring was the electrical conductivity. The most important requirement of this project was to create an easily expandable system, that is, the proposed system allows more machines and parameters to be added in a simple way. The ultimate goal for the company will be to have all machines present in the factory monitored simultaneously and in real time. The observation of the evolution of the selected parameter, that is, of the electrical conductivity, which is of great importance for the quality of the demineralised water, was carried out through a quality control system, where quality control charts and extrapolation techniques were used. Through the quality control charts a solid method of real-time monitoring of the process was obtained and the purpose of the extrapolation techniques was to predict possible failures and maintenance required in the demineralization machine, in order to reduce unnecessary costs while maintaining a good System in a reliable, robust and cost-free way for the company.

Agradecimentos

O segundo semestre do ano letivo 2016/2017 foi marcado pela realização deste projeto de dissertação, que contou com o auxílio e incentivo de várias pessoas.

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Professor Doutor Paulo José Lopes Machado Portugal pelo fantástico apoio cedido desde o primeiro semestre. À equipa da Flexipol, que se mostrou sempre disponível para ajudar em todos os aspetos, em especial ao Engenheiro Mauro Pereira e ao Engenheiro Marco Silva.

Aos meus colegas que me acompanharam em todo este percurso, desde o primeiro ano, ao Rafael Cavalheiro e Edgar Couto e em especial, para a realização deste projeto, ao Carlos Coelho, José Pedro Ferreira e Diogo Mother.

Às minhas irmãs, Joana e Teresa por toda a amizade.

À Ana, que me acompanhou de perto este semestre, por toda a paciência e apoio.

Por fim, dirijo aos meus pais um agradecimento especial pelos conselhos incansáveis e apoio cedido desde sempre. Obrigado por terem acreditado sempre nas minhas capacidades e me terem ajudado a ultrapassar todos os meus obstáculos.

Rui Alves

“Engineering is a great profession. There is the satisfaction of watching a figment of the imagination emerge through the aid of science to a plan on paper. Then it moves to realisation in stone or metal or energy. Then it brings homes to men or women. Then it elevates the standard of living and adds to the comforts of life. This is the engineer’s high privilege.”

Herbert Hoover

Conteúdo

Agradecimentos	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
2 Enquadramento teórico e tecnológico	5
2.1 Introdução	5
2.2 Tratamento da água	5
2.2.1 Condutividade elétrica	6
2.2.2 Máquina de desmineralização	9
2.3 Manutenção, qualidade e controlo do processo	12
2.3.1 Controlo estatístico do processo	12
2.3.2 Cartas de controlo da qualidade	16
2.3.3 Manutenção e falhas	23
2.4 Conclusões	27
3 Sistema de monitorização	29
3.1 Análise de requisitos	29
3.2 Solução proposta	30
3.2.1 Adicionar máquinas ao sistema	30
3.2.2 Adicionar parâmetros ao sistema	32
3.2.3 Adicionar utilizadores ao sistema	34
3.2.4 Base de dados	35
3.3 Implementação	37
3.4 Resultados	38
3.5 Conclusões	38
4 Sistema de controlo da qualidade	39
4.1 Cartas de Controlo da Qualidade	39
4.1.1 Análise de requisitos	39
4.1.2 Solução proposta	40
4.1.3 Implementação	46
4.1.4 Resultados	47
4.2 Extrapolação	47
4.2.1 Análise de requisitos	48
4.2.2 Solução proposta	48

4.2.3	Implementação	50
4.2.4	Resultados	51
4.2.5	Conclusões	51
5	Conclusões e Trabalho Futuro	53
5.1	Satisfação dos Objetivos	53
5.2	Trabalho Futuro	54
	Referências	57
A	Sensor de condutividade elétrica	61
B	<i>Analog input unit</i>	65
C	Dados da condutividade para a 1ª análise	67
D	Dados da condutividade para a 2ª análise	69
E	Dados da condutividade para a 3ª análise	71
F	Fatores para as cartas de controlo de qualidade	73
G	Valores da condutividade elétrica para análise de extrapolação	75

Lista de Figuras

2.1	Gama de condutividades elétricas medidas em $\mu S.cm^{-1}$ [1]	8
2.2	Sistema utilizado no trabalho	9
2.3	Quatro tipos de carvão ativado diferentes [2]	10
2.4	Esquema de um filtro de osmose inversa	10
2.5	Função afim do valor de condutividade elétrica em função da corrente	11
2.6	Gráfico da função de distribuição normal [3]	14
2.7	Modelo SPC simplificado. Adaptado de [4]	14
2.8	Diagrama de causa efeito ou espinha de peixe	15
2.9	Exemplo de carta de controlo típica [5]	16
2.10	Cartas de controlo comuns	16
2.11	Tipos de descontrolo monitorizados através de uma carta do tipo variável [6]	17
2.12	Falhas num sistema	23
2.13	Evolução temporal de falhas num sistema [7]	25
3.1	Esquema do sistema de monitorização	31
3.2	Formulário para adicionar uma máquina ao sistema de monitorização	31
3.3	<i>Dashboard</i> com todas as máquinas adicionadas ao sistema a ser monitorizadas	32
3.4	Exemplo de uma máquina listada	32
3.5	Exemplo de parâmetro inserido no sistema de monitorização	33
3.6	Associação de uma máquina a parâmetro no formulário do sistema	33
3.7	Máquina "teste" e respetivos parâmetros a serem monitorizados	34
3.8	Alarme de "alerta" na máquina "teste" e parâmetro "ângulo"	34
3.9	Alarme de "perigo" na máquina "teste" e parâmetro "ângulo"	34
3.10	Exemplo de parâmetro adicionado ao sistema	34
3.11	Formulário para adicionar utilizadores ao sistema	35
3.12	Modelo entidade relação	35
3.13	Exemplo de máquina inserida na base de dados	36
3.14	Associação de uma máquina a um parâmetro no formulário do sistema	36
4.1	Dados da condutividade elétrica	41
4.2	Carta das médias para as quatro horas da tarde	42
4.3	Carta das amplitudes para as quatro horas da tarde	43
4.4	Carta das médias para as nove horas da manhã	43
4.5	Carta das amplitudes para as nove horas da manhã	43
4.6	Carta das médias para as seis horas da tarde	44
4.7	Carta das amplitudes para as seis horas da tarde	44
4.8	Exemplo de estrutura de dados FIFO	45
4.9	Exemplo de limite de controlo ultrapassado	47

4.10	Esquema representativo da possível reta de extrapolação linear com o valor no tempo $n \cdot \Delta t$ para ser determinado	48
4.11	Valores da condutividade retirados para as diferentes horas de análise de análise	49
4.12	Valores da condutividade retirados desde dia 21 de Junho a dia 2 de Junho	49
4.13	Valores da condutividade e curva de tendência polinomial	50
A.1	<i>Datasheet</i> do sensor de condutividade elétrica (primeira página)	62
A.2	<i>Datasheet</i> do sensor de condutividade elétrica (segunda página)	63
B.1	<i>Datasheet</i> do <i>analog input unit</i>	66
C.1	Dados da condutividade elétrica para a análise das quatro horas da tarde	67
D.1	Dados da condutividade elétrica para a análise das nove horas da manhã	69
E.1	Dados da condutividade elétrica para a análise das seis horas da tarde	71
F.1	Fatores para as cartas \bar{x} e R e para as cartas \bar{x} e σ . Adaptado de [8]	73
F.2	Fatores para as cartas de mediana e valores individuais e amplitude móvel. Adaptado de [8]	74
G.1	Valores da condutividade elétrica para os dias e horas de análise	75

Lista de Tabelas

2.1	Valores de condutividade e resistividade para diferentes tipos de água [9]	8
4.1	Limites para as cartas de média e amplitude	42
4.2	Valores dos limites superiores, centrais e inferiores para as cartas das médias e amplitudes para as três horas em análise	44
4.3	Análise de padrões não naturais nas cartas das médias e amplitudes	47
4.4	Equações das curvas de extrapolação e valor do coeficiente de determinação . . .	50

Abreviaturas e Símbolos

AIU	<i>Analog Input Unit</i>
CB	<i>Condition Monitoring</i>
CBM	<i>Condition-based maintenance</i>
CCQ	Cartas de Controlo de Qualidade
CE	Condutividade elétrica
CEP	Controlo Estatístico do Processo
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i>
CSN	<i>Closed skew s-normal distribution</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LC	Limite Central
LIC	Limite Inferior de Controlo
LSC	Limite Superior de Controlo
MC	Manutenção Corretiva
MFE	<i>Modified fault estimation</i>
MPRE	Manutenção Preditiva
MP	Manutenção Preventiva
PF	<i>Particle filter</i>
PLC	<i>Programmable Logic Computer</i>
R	Resistência elétrica de um material
RLD	<i>Residual Life Distribution</i>
SI	<i>Système international d'unités</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
SUDM	<i>Sensory-updated degradation-based predictive maintenance</i>
WLC	<i>Weighted Loss function</i>

σ	Desvio padrão
σ_e	Condutividade elétrica
μ	Valor esperado
ρ	Resistividade elétrica

Capítulo 1

Introdução

Com a finalidade de aumentar a eficiência e produtividade industrial, vários países impulsionaram a denominada quarta revolução industrial, de modo a serem introduzidas, neste setor, novas tecnologias emergentes tais como a *Internet of things*, redes de sensores *wireless*, *big data*, sistemas embarcados, Internet móvel e *cloud computing*.

O governo Alemão foi o pioneiro nesta revolução ao apresentar o "*Industrie 4.0*", como parte de um plano denominado "*High-Tech Strategy 2020 Action Plan*". Estratégias similares foram propostas pelos Estados Unidos através do "*Industrial internet*" e pela China com o "*Internet+*" [10].

O setor industrial está em recorrente transformação, aproximando-se cada vez mais da denominada *predictive manufacturing* ([11]), que tem como principal objetivo tornar as máquinas e sistemas com capacidade de averiguar o seu estado, tudo isto feito através de *softwares* inteligentes.

Neste âmbito, surgiu este trabalho que teve como objetivo a implementação de um sistema de monitorização e um sistema de controlo de qualidade, numa tentativa de, através do primeiro, observar e avaliar, em tempo real, possíveis comportamentos que levam a anomalias, diminuir drasticamente prejuízos desnecessários, principalmente relativos à manutenção e, com o sistema de controlo da qualidade, avaliar e prever possíveis falhas no sistema e a evolução dos parâmetros mensurados ao longo do tempo.

1.1 Motivação

Este projeto foi desenvolvido na empresa Flexipol, produtora de espumas sintéticas para vários setores, entre os quais o ramo automóvel e colchoaria. Esta empresa possui inúmeras máquinas com várias finalidades e é importante que estas estejam sempre em bom funcionamento de modo a não haver perdas de produção. Outro fator essencial a ter em conta é o facto de, sendo uma empresa produtora de espumas sintéticas, a segurança é um fator essencial a ter em conta, dado que muitos dos químicos utilizados podem ser perigosos. Como tal surgiu este projeto que visa

uma melhoria significativa no controlo da maquinaria, tendo em vista a redução de falhas, avarias e perdas de produção.

O sistema de monitorização é, para a empresa, uma forma simples de monitorizar, no mesmo *software*, as várias máquinas existentes.

Dado o facto de estas máquinas requererem bastante manutenção, construíram-se também cartas de controlo de qualidade e um sistema preditivo que têm em conjunto o objetivo de averiguar se de facto é necessário realizar manutenção, tentando com isto, reduzir custos desnecessários, mantendo sempre os equipamentos em bom funcionamento.

Todos os sistemas são suscetíveis ao aparecimento de falhas, quer sejam incipientes, abruptas e intermitentes. Como tal, pretende-se também com o sistema preditivo, identificar estas falhas e prevê-las, através de análises criteriosas da evolução, ao longo do tempo, dos parâmetros a ser monitorizados.

Existem, já no mercado, sistemas capazes de monitorizar e prever possíveis falhas, em tempo real, em máquinas industriais. Existem já, por exemplo, sistemas SCADA preparados com sistemas de monitorização e sistemas preditivos mas, por norma, são sistemas complexos, com várias funcionalidades, o que não foi, no momento do desenvolvimento deste projeto o intuito da Flexipol, dado que o objetivo foi de criar um sistema base que pudesse, de futuro, ser modificado, acrescentando-se desta forma, novos sistemas.

Como tal, a melhor solução encontrada para a empresa foi mesmo a criação de um sistema de raiz que tivesse a capacidade de, no futuro, serem adicionadas outras funcionalidades.

1.2 Objetivos

São enumerados de seguida os objetivos propostos para esta dissertação, relativos ao sistema de monitorização e ao sistema de controlo da qualidade.

1. **Sistema de monitorização:** Capaz de monitorizar, em tempo real, um parâmetro de uma máquina. Fazer o sistema em *web* e de tal forma que seja possível adicionar novas máquinas e novos parâmetros de forma simples e consistente. Pretende-se também incorporar alarmes, com o objetivo de avisar os utilizadores de possíveis situações que possam eventualmente por em causa o bom funcionamento do sistema.
2. **Sistema de controlo da qualidade:** Averiguar se os parâmetros monitorizados se encontram ou não numa situação de controlo e, em caso negativo, estudar o comportamento destes e retirar conclusões, através de cartas de controlo da qualidade.

Para o caso de estudo específico deste trabalho, ou seja, utilizando as cartas de controlo da qualidade para avaliar a evolução da condutividade elétrica na máquina de desmineralização ao longo do tempo pretende-se, com cartas de média e amplitude, verificar se com os valores obtidos deste parâmetro são coerentes. Desta forma consegue-se compreender se a máquina se encontra ou não em bom funcionamento.

Em segundo lugar, utilizam-se cartas de valores individuais e amplitude móvel com o objetivo de verificar o estado dos parâmetros a ser monitorizados, em tempo real.

Neste sistema é também utilizado um método de extrapolação com a finalidade de verificar se é possível observar tendências do parâmetro a ser monitorizado. Com isto pretende-se averiguar, através deste caso de estudo, se é viável compreender, através destes métodos, quando é necessário executar manutenção na maquinaria e verificar que tipo de falhas é que podem eventualmente acontecer no sistema.

1.3 Estrutura

Depois deste capítulo inicial, onde se apresenta a introdução do trabalho, apresenta-se, no capítulo 2, o enquadramento teórico e tecnológico. Dado o facto de que, para este trabalho, ter sido utilizado como caso de estudo uma máquina de desmineralização, abordam-se alguns aspetos teóricos relativos a processos de tratamento de água, condutividade elétrica e máquina de desmineralização.

De seguida, ainda neste capítulo, apresentam-se definições e conceitos de manutenção, qualidade e controlo do processo, focando-se este estudo nas cartas de controlo da qualidade, manutenção e falhas possíveis em sistemas industriais.

No capítulo 3 apresenta-se o sistema de monitorização, no 4 o sistema de controlo da qualidade, e por fim, no 5 as conclusões relativas à realização deste trabalho e trabalho futuro.

Capítulo 2

Enquadramento teórico e tecnológico

2.1 Introdução

Nesta dissertação foram implementados um sistema de monitorização e um sistema de controlo da qualidade. O sistema de monitorização teve como objetivo apresentar os valores, em tempo real, de parâmetros de máquinas a ser monitorizadas, assim como os resultados provenientes do sistema de controlo da qualidade. Este último teve o objetivo de averiguar, em tempo real, o estado de controlo das máquinas através de cartas de controlo da qualidade e prever possíveis falhas nas máquinas.

Estes sistemas foram testados numa máquina de desmineralização de água e o parâmetro utilizado foi a condutividade elétrica da mesma.

Este capítulo apresenta o estudo realizado para a implementação dos sistemas de monitorização e de controlo da qualidade. Abordam-se, em 2.2, a resistividade e condutividade elétrica da água, características importantes para averiguar o grau de desmineralização da mesma. É explicada também a máquina de desmineralização e os processos para a sua obtenção. No subcapítulo 2.3 são abordados conceitos teóricos relativamente à manutenção industrial bem como qualidade e controlo de processos. Por fim, em 2.4, retiram-se as conclusões deste segundo capítulo.

2.2 Tratamento da água

A purificação da água é um processo que tem como objetivo a remoção de químicos, contaminantes biológicos, gases e sólidos suspensos (i.e., pequenas partículas sólidas que se mantêm em suspensão na água) indesejados. Para o consumo humano, a maior parte da água é já desinfetada, mas o objetivo da purificação é tornar a água propícia para ser utilizada em aplicações médicas, farmacológicas, químicas e industriais, não chegando para estas, água desinfetada. Neste caso em específico, a água é utilizada industrialmente para a produção de espumas sintéticas e, para este fim, idealmente, a água é desmineralizada [9, 12, 13].

A destilação é o processo mais antigo de produção de água quase pura, mas ao longo do tempo têm surgido processos físicos, químicos e biológicos tais como filtros de carvão, osmose inversa,

desionização e desmineralização para obter água pura. Uma forma rápida, confiável e de baixo custo de averiguar o grau de pureza da água é através da condutividade elétrica.

Diz-se que a água é desmineralizada quando foi filtrada ou processada de modo a remover iões minerais tais como catiões (sódio, cálcio, ferro, cobre) e aniões (cloretos, sulfatos, nitratos) normalmente presentes na água, sendo propícia para ser utilizada, neste caso, em processos químicos. Este processo de remoção dos sais minerais ocorre utilizando um processo de troca de iões.

2.2.1 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade intrínseca de cada material e quantifica a capacidade de condução de corrente elétrica. A intensidade de corrente elétrica, I , é definida como a carga total que atravessa uma superfície S por unidade de tempo, como representado na equação 2.1 [14, 15].

$$I = \frac{dQ}{dt} = \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS \quad (2.1)$$

Onde I representa a intensidade da corrente elétrica, Q a carga elétrica, \vec{J} a densidade de corrente elétrica e \vec{n} o vetor normal à superfície S . No sistema de unidades SI, a corrente elétrica exprime-se em ampere (A). Experimentalmente verifica-se que existe uma proporcionalidade entre \vec{J} e o campo elétrico \vec{E} , isto é

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E} \quad (2.2)$$

A constante σ_e representa a condutividade elétrica. No sistema de unidades SI, a unidade da densidade de corrente é o ampere por metro quadrado (A/m^2). Verifica-se na equação 2.2 a importância da condutividade elétrica para a densidade de corrente, que se define como a corrente por unidade de superfície [15].

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.3)$$

Para melhor se compreender o que é a condutividade elétrica de um material, é necessário compreender, em primeiro lugar, o que é a resistividade elétrica.

A corrente elétrica que passa num condutor é dada por,

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{e^2 n_e \Delta t A}{m_e L} V \quad (2.4)$$

Onde e representa a carga de um eletrão, n_e o número de eletrões livres por unidade de volume, m_e a massa de um eletrão, A a área de secção, L o comprimento e V a tensão. Comparando esta expressão com a Lei de Ohm, ou seja,

$$I = V/R \quad (2.5)$$

obtêm-se a expressão microscópica para a resistência R ,

$$R = \frac{m_e}{e^2 n_e \Delta t} \frac{L}{A} \quad (2.6)$$

A partir de 2.6 define-se a resistividade elétrica, ρ_e , como

$$\rho_e = \frac{m_e}{e^2 n_e \Delta t} \quad (2.7)$$

Ou seja,

$$R = \rho_e \frac{L}{A} \quad (2.8)$$

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca do material que quantifica a capacidade deste se opor ao fluxo da corrente elétrica e tem como unidades $\Omega \cdot m$. Não depende das dimensões geométricas do material mas, como descrito em [16]:

1. É inversamente proporcional ao número n_e de eletrões livres por unidade de volume. Como n_e depende das características do material, a resistividade depende também da natureza deste;
2. Aumenta com um aumento de temperatura e para ambientes industriais onde não existe muita variação de temperatura, utiliza-se normalmente a seguinte aproximação linear:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.9)$$

Onde α é o coeficiente de temperatura de resistividade, T_0 é uma temperatura fixa de referência e ρ_0 a resistividade para a temperatura T_0 .

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca de todos os tipos de materiais, entre eles estão os metais, semicondutores e eletrólitos. Para este trabalho, interessa o caso específico dos eletrólitos, que são soluções que contêm iões que são partículas formadas pela dissociação de ácidos, bases, sais e também certos gases tais como dióxido de carbono, amónia e cloreto de hidrogénio. Em quase todas as soluções deste tipo, a água é o solvente já que tem a capacidade de estabilizar os iões formados [17, 13]. Os compostos que produzem um elevado número de iões numa solução são denominados eletrólitos fortes, tais como sais, ácidos fortes e bases fortes. Estes químicos dissociam-se completamente em iões em soluções aquosas. No caso contrário, denominam-se eletrólitos fracos.

Surge, neste momento, a importância da condutividade, que mede a habilidade da solução conduzir eletricidade [1].

A condutividade σ_e é definida como o recíproco da resistividade.

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho_e} = \frac{n_e \cdot e^2 \Delta t}{m_e} \quad (2.10)$$

Esta grandeza é medida em Siemens por metro S/m mas, por conveniência, é usualmente expressa, em utilizações industriais, em microSiemens por centímetro ($\mu S/cm$). Na figura 2.1 pode-se observar a gama de medição, em $\mu S/cm$, desde água pura, que apresenta um nível de condutividade elétrica extremamente baixo até materiais tais como a água do mar e soluções com 30% de ácido sulfúrico, que contrariamente à água pura, apresentam níveis muito elevados de condutividade elétrica. Apresenta-se também, na tabela 2.1, valores de resistividade e condutividade elétrica para diferentes tipos de água, a 25°C: pura, destilada, desionizada, desmineralizada, potável e do mar.

Tabela 2.1: Valores de condutividade e resistividade para diferentes tipos de água [9]

Tipo de água	Resistividade	Condutividade
Pura	100000 a 1000000	0,01 a 0,1
Destilada	10000	1
Desmineralizada	2500 a 5000	2 a 4
Potável	200	50
Mar	0,1 a 1	10000 a 100000

Pela tabela verifica-se que até a água pura que é definida como não tendo qualquer tipo de impurezas, tem sempre uma condutividade elétrica. Esta deve-se ao facto de haver sempre presentes na água, iões H^+ e OH^- , devido à auto-ionização da água [18].

Como a atividade iónica, ou seja, o movimento dos iões aumenta com o aumento da temperatura, as medições da condutividade tabuladas são, normalmente, para uma temperatura de referência de 25°C. Um aumento na temperatura pode também causar um aumento do número de iões numa solução devido à dissociação molecular. O coeficiente de variação de temperatura é definido como o rácio a que há um aumento da condutividade elétrica para um aumento da temperatura, sendo este valor em percentagem, para um aumento de temperatura de 1°C. Este coeficiente é diferente para cada solvente sendo que, para água pura, um aumento de 0,1°C corresponde um aumento da condutividade de 0,55% [19, 20, 21], o que leva a concluir que o controlo da temperatura é importante para medir a condutividade elétrica e, idealmente, em ambientes industriais, a temperatura é mantida constante.

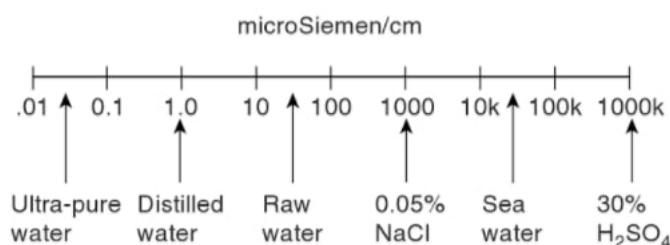


Figura 2.1: Gama de condutividades elétricas medidas em $\mu S.cm^{-1}$ [1]

Em suma, a medição da condutividade elétrica é importante para verificar o grau de pureza da água, dado o facto de ser um método simples, económico e eficiente.

2.2.2 Máquina de desmineralização

O sistema utilizado neste trabalho está representado na figura 2.2. A entrada do sistema é água potável. Esta é encaminhada para a máquina de desmineralização que contém três filtros diferentes: um filtro de cartão ativo, de sal e de osmose inversa. A água passa pelos três filtros, pela ordem descrita. Na saída da máquina existe um sensor que mede a condutividade elétrica da água desmineralizada. A informação do sensor, analógica, é convertida em formato digital através do AIU (*Analog Input Unit*), que passa depois para os registos de memória do PLC (*Programmable Logic Controller*).

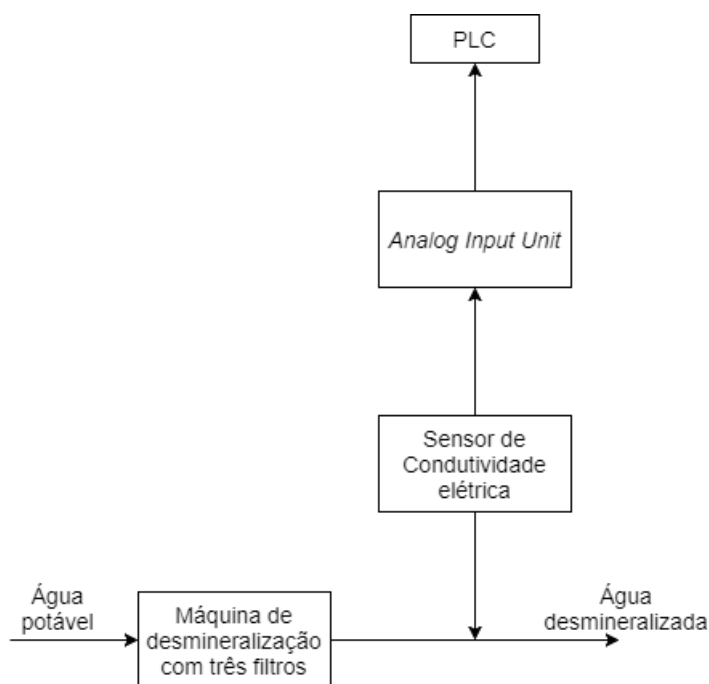


Figura 2.2: Sistema utilizado no trabalho

Enumeram-se de seguida os diferentes componentes do sistema.

1. **Máquina de desmineralização:** A máquina de desmineralização apresenta, no seu interior, como já mencionado, três filtros distintos.

- (a) Filtro de areia: É o primeiro filtro da máquina de desmineralização pois é utilizado quando a quantidade de matéria que tem que ser retida é elevada, sendo propício para remover sólidos suspensos e impurezas não dissolvidas, geralmente metais e pó [22].
- (b) Filtro de carvão ativo: composto por carvão ativado que é uma forma de carvão processado que apresenta poros de baixo volume e geram uma superfície propícia para absorver impurezas.

Há centenas de tipos diferentes de carvão ativado disponíveis no mercado, caracterizando-se pelos tamanhos diferentes dos poros. Na figura 2.3 apresentam-se alguns tipos diferentes de carvão ativado. Estes são feitos a partir de madeira, cascas de côco, caroços

da fruta, carvão e sistemas macromoleculares. Estes filtros têm várias aplicações na remoção de impurezas na água, ar e gases. Estes filtros são eficientes na remoção cloro, sedimentos e compostos orgânicos voláteis [23].



Figura 2.3: Quatro tipos de carvão ativado diferentes [2]

- (c) Filtro de osmose inversa: É uma tecnologia de purificação de água que tem como objetivo a separação do solvente (água) do soluto através de uma membrana semipermeável. O soluto, neste caso, é o conjunto de todas as substâncias que prevaleceram na água depois de passarem pelos dois primeiros filtros. Este filtro é ideal para a remoção de solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou moléculas orgânicas. Este processo está representado na 2.4. É aplicada uma pressão na água de entrada do filtro que é retida na membrana semipermeável, esta que deixa passar através dos seus poros o solvente e deixa retido, na zona de pressão, o soluto [24, 25].

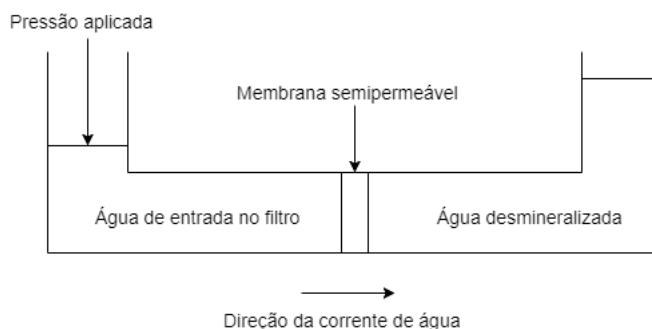


Figura 2.4: Esquema de um filtro de osmose inversa

2. **Sensor de condutividade elétrica:** A condutividade elétrica é usualmente calculada determinando a resistência da solução entre dois eletrodos separados por uma distância fixa, utilizando como alimentação uma corrente alternada, tal como descrito em [26]. Neste caso em específico, a empresa já possuía na máquina um sensor implementado para medição da condutividade elétrica, da marca Create, modelo CM-230, com *output* de corrente entre 4 e 20 mA. Esse sensor está disponível no anexo A. Observando a *datasheet* do sensor, verifica-se que este tem como saída um sinal analógico de, no máximo, 4mA e um alcance entre

0 – 1999 $\mu S/cm$. O *output* do sensor, ou seja, a saída, é um valor analógico de corrente que representa a condutividade elétrica através de uma simples função afim:

$$y_c = \frac{1999 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot x_a = 0.4998 \cdot x_a \quad (2.11)$$

Onde y_c representa o valor da condutividade elétrica, em S/cm e x_a representa o valor da corrente, em ampere. Esta função está representada em 2.5, onde no eixo das abcissas está representada a corrente e no eixo das ordenadas a condutividade elétrica.

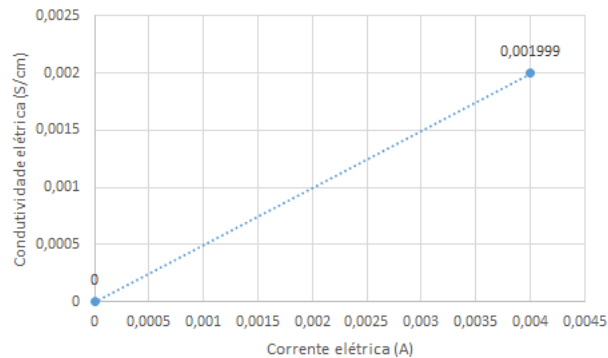


Figura 2.5: Função afim do valor de condutividade elétrica em função da corrente

3. **Analog Input Unit:** Para a informação recolhida pelo sensor ser útil, esta tem que ser convertida em informação digital. Deste modo, é armazenada no PLC e enviada depois para o servidor da empresa. Para essa conversão, o sensor está conectado a um *Analog Input Unit* (NX-AD4203), cuja *datasheet* se encontra disponível no anexo B. O *output* desta unidade é um valor discreto, entre 1 e 8000, como se pode verificar pelo *range* na *datasheet*, estando este por sua vez conectado ao PLC.

Assim, o valor analógico de corrente, entre aproximadamente 0 e 4mA, é convertido no AIU num valor entre 1 e 8000. Portanto, o valor que será armazenado no PLC é um valor digital. Para ser utilizado mais tarde no sistema de monitorização, que terá de ser convertido novamente no valor da condutividade elétrica, em $\mu S/cm$. Para tal, a conversão faz-se através de uma regra simples, como representado na equação 2.12:

$$x_c = \frac{x_d \cdot 1999 (\mu S/cm)}{8000} \quad (2.12)$$

Sendo x_c o valor, em $\mu S/cm$, da condutividade elétrica e x_d o valor digital recebido.

4. **Programmable Logic Controller:** Relativamente ao PLC, é da marca Omron e modelo NJ301-1100. Este comunica com a máquina através do protocolo de comunicação Ether-Net/IP.

EtherNet/IP utiliza a infraestrutura Ethernet para gerir as conexões entre o autómato, o AIU e o sensor. Este protocolo robusto é baseado no CIP (*Common Industrial Protocol*) [27, 28]. Os pacotes de informação vindos dos endereços de memória do PLC são enviados até ao servidor através do protocolo TCP/IP.

2.3 Manutenção, qualidade e controlo do processo

De modo sucinto, como representado na figura 2.2, a obtenção de água desmineralizada passa por um processo produtivo que começa com a matéria prima, que é a água potável. Esta passa por um conjunto de processos na máquina de desmineralização. À saída da máquina encontra-se o sensor de condutividade elétrico, apresentado em 2.2.2, que mede a condutividade elétrica da água, podendo-se desta forma concluir se a água está em condições ou não de ser utilizada nos processos químicos. Como já foi previamente explicado em 2.2.1, valores de água desmineralizada encontram-se entre 0,01 a 0,1 $\mu S/cm$, representados na figura 2.1. "Os processos produtivos apresentam sempre um dado nível de variabilidade como resultado apenas da sua aleatoriedade intrínseca"[29], portanto é normal que o valor lido à saída, da condutividade elétrica, nunca seja o mesmo, oscilando entre um valor médio.

Quando os valores lidos saem dessa zona de controlo, causas comuns, tais como desgaste dos componentes da máquina, como por exemplo dos filtros e mesmo o estado dos sensores, podem ser responsáveis por esta variação. Estas causas são assumidas como sendo aleatórias e independente e são inerentes ao processo, ou seja, dificilmente se podem eliminar. Causas imprevisíveis, geradas por fatores irregulares e instáveis [6] são também responsáveis pelo denominado fenómeno da variação. Surge então a importância de técnicas estatísticas e probabilísticas cujas análises auxiliam no controlo de processos para estes se manterem num estado de controlo.

Para melhor compreender os termos mencionados acima tais como processo, qualidade, variabilidade e técnicas estatísticas, apresentam-se as próximas subsecções de modo a tornar mais compreensível o intuito da sua utilização para o problema em questão.

2.3.1 Controlo estatístico do processo

Quando se fala em processos industriais, como é o caso deste projeto, a palavra qualidade vem sempre associada. Portanto, surge a necessidade de definir o conceito de qualidade e qual a sua verdadeira importância. Aceite por vários profissionais na área da qualidade, surge a seguinte definição:

"The totality of features and characteristics of a product or service that bear on its ability to satisfy stated or implied needs." [7]

Ou seja, um produto final tem boa qualidade quando cumpre com os requisitos especificados pelo cliente, e para estes serem constantemente atingidos, é utilizada informação estatística para monitorizar e controlar o processo em questão. No caso específico deste projeto, cuja saída do

sistema é a água desmineralizada, não significa que a obtenção de valores distintos de condutividade elétrica se traduza numa má qualidade da saída. Devido a vários fatores tais como o estado e desgaste da máquina, a manutenção dos equipamentos, as condições climáticas, o valor da saída pode alterar, mantendo mesmo assim valores consistentes que se traduzem numa saída viável. Mas o contrário também pode acontecer, ou seja, esses fatores podem alterar a saída de tal ordem que esta já não tem qualidade, não satisfazendo desta forma o cliente. Surge então a questão inevitável da variabilidade que torna a análise dos dados amostrais e tomada de decisões complexa.

A variabilidade é definida em [5] como sendo inversamente proporcional à qualidade, o que implica que se a variabilidade nas características importantes de um processo diminuir, a qualidade do produto final aumenta. Pode ser motivada pelas denominadas causas comuns, que são inerentes ao processo e são consideradas aleatórias e independentes e causas especiais (ou assinaláveis) que são fatores irregulares e instáveis, tornando-as imprevisíveis [29, 30].

Quando a característica do sistema que está a ser avaliado reflete apenas efeitos de causas comuns de variação, diz-se que o processo subjacente se encontra estatisticamente numa situação de controlo, podendo-se admitir que a característica em avaliação seguirá uma distribuição de probabilidades estável com parâmetros constantes. Esta distribuição é uma função simétrica e continua, cuja função densidade de probabilidade é definida como em 2.13.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < +\infty \quad (2.13)$$

Onde μ e σ são respetivamente a média e o desvio padrão.

Para facilitar a compreensão desta distribuição, é usual utilizar uma média igual a zero, $\mu = 0$, e desvio padrão igual a um, $\sigma = 1$. Assim sendo, esta distribuição, definida na equação 2.14, tem o nome de distribuição normal *standard* e está representada na figura 2.6. Pode-se verificar que toda a distribuição é virtualmente dividida dentro de três desvios padrões *standard* da média. Com $k = 1$, $k = 2$ e $k = 3$, 68,27% da distribuição está compreendida respetivamente entre $\mu \pm \sigma$, 95,45% está compreendida entre $\mu \pm 2\sigma$ e 99,73% da distribuição encontra-se entre $\mu \pm 3\sigma$.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.14)$$

Em suma, um processo estará numa situação de controlo quando a distribuição da variável de falhas/produto não conforme se mantiver constante. Neste caso, a probabilidade destas causas de encontrarem no intervalo $\mu \pm k\sigma$ é constante.

Para se verificar se determinada característica é bem modelada por uma distribuição normal, podem ser utilizados testes de normalidade. Em [31] e [32] são enumerados vários métodos com essa finalidade.

Quando se evidenciam causas especiais no sistema, considera-se que este está numa situação fora de controlo. Como já se pôde concluir, a variabilidade é uma questão importantíssima para

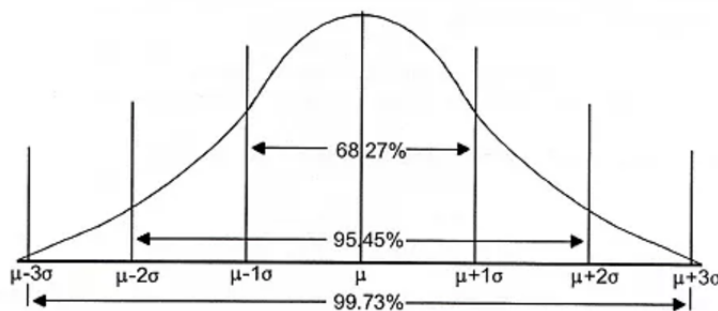


Figura 2.6: Gráfico da função de distribuição normal [3]

avaliar a qualidade de um sistema. Esta tem, como tal, que ser analisada de forma criteriosa. Para isso devem ser recolhidas várias amostras com os mesmos limites temporais e avaliar a distribuição dos seus resultados.

Surge então o Controlo Estatístico do Processo (*Statistical Process Control*), ou SPC. O modelo típico do SPC está representado na figura 2.7 e resulta da aplicação de ferramentas estatísticas para melhorar continuamente o processo, visando reduzir a variabilidade, aumentando a qualidade. A isto chama-se melhoria da qualidade (*quality improvement*). Desta forma melhora-se o produto final e reduz-se o excesso de variabilidade que se traduz em diminuição de perdas no sistema.

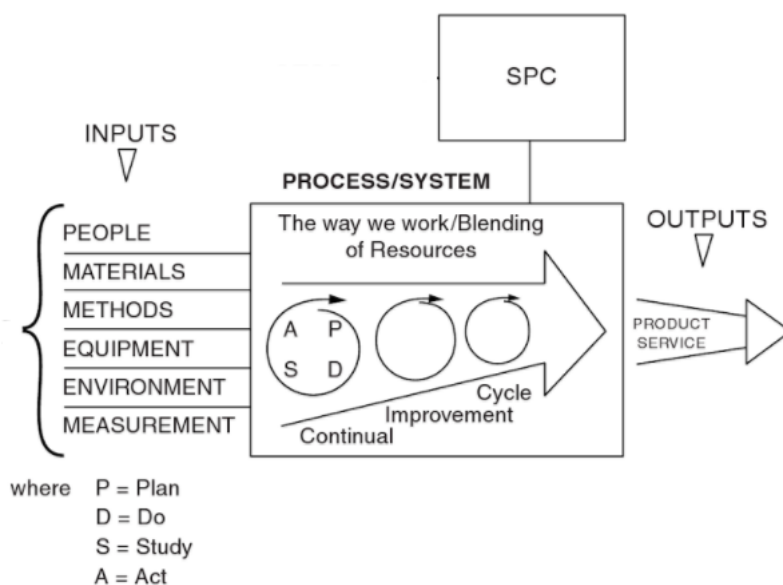


Figura 2.7: Modelo SPC simplificado. Adaptado de [4]

Os dados estatísticos são então analisados através de técnicas SPC, cuja análise de dados amostrais e tomada de decisão se torna complicada devido à variabilidade. As técnicas listadas abaixo oferecem uma forma de organizar, coletar, apresentar e analisar informação vinda dos parâmetros ou características mensuradas:

- Histogramas;

- Gráficos;
- Análise de Pareto;
- *Check sheets*;
- Análise de causa efeito;
- *Scatter diagrams*;
- Cartas de controlo;
- *Process flowcharting*.

Para este projeto em questão, em que se pretende medir a variabilidade da condutividade elétrica na saída do sistema, ou seja, da água desmineralizada, utilizaram-se cartas de controlo da qualidade, dado que, após revista a literatura, ser um método que, a nível industrial, apresenta bons resultados a nível de monitorização, conseguindo-se com este obter uma boa perceção do estado do sistema. Como a variabilidade pode depender de vários fatores, aliado às cartas de controlo da qualidade poder-se-ia utilizar também uma diagrama de causa efeito, como representado na figura 2.8 (também conhecido como diagrama de espinha de peixe), de modo a averiguar o que é que poderia estar mal no sistema, já que leva em consideração quais as causas para o problema. Segundo *Kaoru Ishikawa*, o criador do diagrama, são seis as causas que podem afetar potencialmente a saída do sistema: Método, Máquina, Medida, Meio Ambiente, Mão de obra e Material. Portanto, no caso de uma das cartas de controlo da qualidade dimensionadas para o sistema demonstrasse alguma situação fora do controlo, os diagramas de causa efeito poderiam ser um método para tentar encontrar a fonte do problema, apesar de, neste trabalho, não foi necessário recolher a este método.

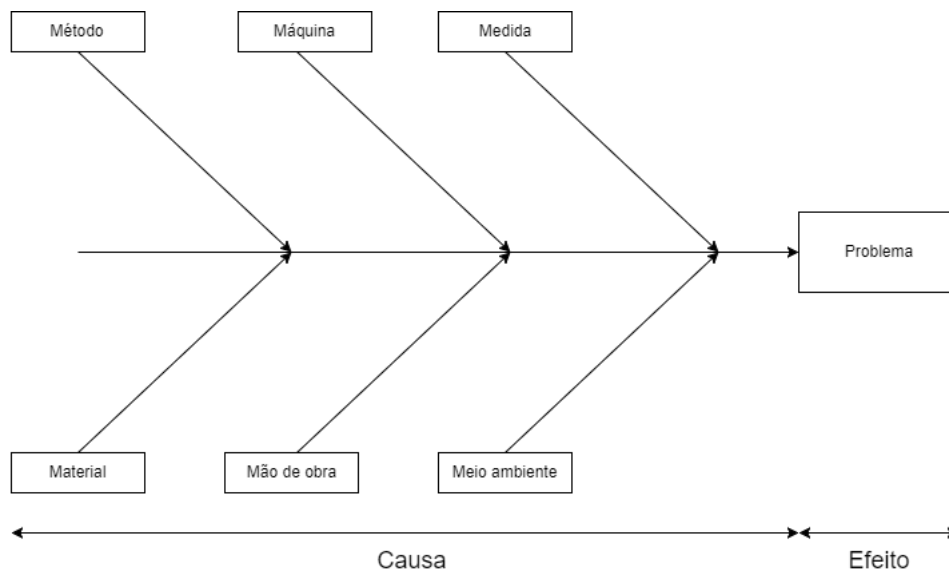


Figura 2.8: Diagrama de causa efeito ou espinha de peixe

2.3.2 Cartas de controlo da qualidade

Uma carta de controlo, ou carta de Shewhart (nome dado devido ao seu criador, Walter A. Shewhart) é uma técnica SPC. Uma carta típica está representada na figura 2.9. Nesta carta são representados a média dos valores de uma característica do processo segundo o tempo (ou o número de amostras). Esta carta é composta por uma linha central (LC) e dois limites, um superior (LSC) e um inferior (LIC). A linha central representa o valor que a característica a ser mensurada deve ter se não houver variabilidade e os limites são calculados com base na média e desvio padrão das amostras recolhidas. Através destas cartas é possível monitorizar o processo a ser estudado em tempo real ([5]). É habitual utilizar-se uma escala em que a altura do gráfico, ou seja, a distância h entre LSC e LIC seja calculada como $h = LSC - LIC \approx 6\Delta x$, com Δx representando a distância entre dois pontos sucessivos mensurados ([33]).

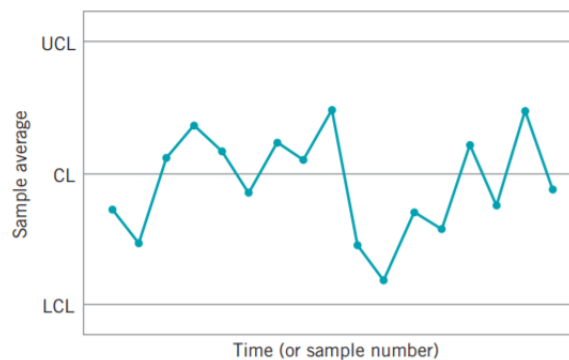


Figura 2.9: Exemplo de carta de controlo típica [5]

Existem dois grandes grupos de cartas de controlo. Em [33] utilizou-se como critério de classificação a dimensão das amostras e no tipo de dados que são utilizados, discretos ou contínuos. Aos dados discretos dá-se o nome de atributos e aos dados contínuos dá-se o nome de variáveis. Neste caso em específico lidou-se com dados contínuos e como tal é importante explicar somente o tipo de cartas de controlo variáveis, que se dividem em três ramos, dependendo de N , o tamanho da amostra, como representado na figura 2.10.

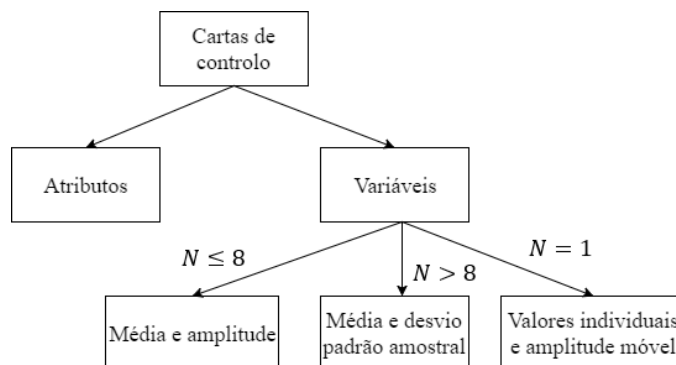


Figura 2.10: Cartas de controlo comuns

Com o intuito de monitorizar o estado de controlo deste sistema através da medição da condutividade elétrica, a escolha entre as diferentes cartas prendeu-se logo à partida nas cartas de controlo do tipo variável, dado que as cartas para atributos estão relacionadas com o registo de unidades não conformes e não com a evolução temporal de determinada característica, neste caso, a condutividade elétrica. Já as cartas do tipo variáveis são utilizadas para medir características numa escala numérica, ao longo do tempo, portanto, concluiu-se que seria ideal recorrer a este tipo de carta.

As cartas de controlo para variáveis são construídas a partir de estatísticas que derivam de dados quantitativos contínuos e são, em geral, utilizadas aos pares: numa das cartas analisa-se a variabilidade do processo e na outra a tendência central do parâmetro (normalmente o valor esperado). Isto acontece dado que um ponto fora do controlo numa carta pode ser observado, como representado na figura 2.11, através de uma alteração da variância (i), numa alteração do valor esperado (ii) ou em ambos os casos (iii). Como tal, conclui-se que um ponto fora do controlo pode derivar de uma deslocação da distribuição ou a um aumento da variabilidade, sendo por isso vantajoso utilizar duas cartas já que estas avaliam condições diferentes: a carta de controlo da amplitude ou desvio padrão avaliam a homogeneidade da variabilidade do processo e a carta de controlo das médias ou a carta de valores individuais a estabilidade do valor esperado [6].

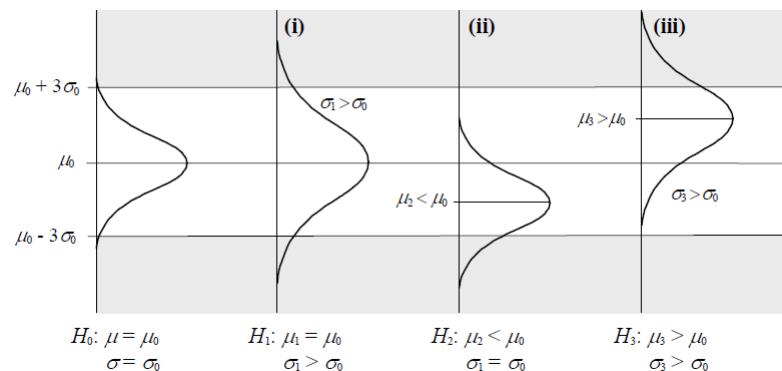


Figura 2.11: Tipos de descontrolo monitorizados através de uma carta do tipo variável [6]

Restou então escolher qual a carta ideal dentro das três possíveis, como representado na figura 2.10. Enumeradas, de seguida, apresentam-se as três cartas de controlo da qualidade para variáveis: (1) CCQ de valores individuais e amplitude móvel, (2) CCQ de média e amplitude e por último, (3) CCQ de média e desvio padrão. Neste trabalho serão utilizadas a primeira e segunda enumeradas.

1. **Cartas de valores individuais e amplitude móvel, cartas \bar{x} e MR :** são assim chamadas já que a amplitude das observações individuais é comumente utilizado para determinar os limites de controlo. São normalmente utilizadas para estudar variáveis de processos ou produtos, tais como pressão, temperatura ou, como neste caso, a condutividade elétrica, para os quais se torna difícil, pouco económico ou impraticável obter várias medições num curto período de tempo, sendo por isso não aconselhável a utilização de cartas $\bar{\bar{x}}$ e R (média

e amplitude) ou \bar{x} e cartas de desvio padrão (média e desvio padrão amostral). Portanto, no caso de se querer visualizar a evolução de um parâmetro de um processo em tempo real, as cartas \bar{x} e MR são ideias. Não sendo possível calcular a variabilidade através da amplitude ou do desvio padrão, devido ao facto de se tratar de uma medição individual, calcula-se a amplitude móvel, MR , de duas observações sucessivas como estimativa da variabilidade. Portanto, sendo x_1, x_2, \dots, x_m as observações individuais retiradas ao longo de um dado período de tempo estabelecido, o estimador para os valores individuais é a média desses valores e será [34, 35]

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} \quad (2.15)$$

Onde \bar{x} representa o Limite Central da carta de controlo \bar{x} . A amplitude móvel, MR , é calculada para x_1, x_2, \dots, x_m e define-se então como $MR_i = x_i - x_{i-1}$, para $i = 2, 3, \dots, m$. Portanto, esta será, por fim

$$\overline{MR} = \sum_{i=2}^m \frac{MR_i}{m-1} \quad (2.16)$$

Onde \overline{MR} é o limite central para a carta MR .

Os limites para a carta \bar{x} são calculados da seguinte forma:

$$LSC = \bar{x} + 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.17)$$

$$LIC = \bar{x} - 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.18)$$

d_2 é um valor tabelado, disponível no anexo F, e substituindo $3/d_2$ por E_2 , valor também tabulado e disponível em anexo, vem [34, 35]

$$LSC = \bar{x} + E_2 \cdot \overline{MR} \quad (2.19)$$

$$LIC = \bar{x} - E_2 \cdot \overline{MR} \quad (2.20)$$

Como mencionado acima, a amplitude móvel, MR , corresponde a uma diferença entre dois resultados consecutivos, portanto, dos valores tabulados no anexo F, utiliza-se o valor para E_2 para n_2 , ou seja, $E_2 = 2,660$. Para a carta de controlo MR , os limites de controlo são calculados da seguinte forma [34, 35]:

$$LSC = \overline{MR} + 3 \cdot d_3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.21)$$

$$LIC = \overline{MR} - 3 \cdot d_3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.22)$$

Pondo em evidência MR , nas equações 2.21 e 2.22, vem

$$LSC = \overline{MR}(1 + \frac{3_3}{d_2}) = \overline{MR} \cdot D_4 \quad (2.23)$$

$$LIC = \overline{MR}(1 - \frac{3_3}{d_2}) = \overline{MR} \cdot D_3 \quad (2.24)$$

Sendo D_4 e D_3 valores tabulados disponíveis no anexo F. Estas cartas serão utilizadas neste trabalho para monitorizar, em tempo real, o estado de controlo do parâmetro a ser mensurado da máquina de desmineralização da água, a condutividade elétrica.

2. **Cartas de média e amplitude, \bar{x} e R :** A carta \bar{x} é a mais comum para cálculos de tendência central na distribuição subjacente de uma característica de um processo. Já a carta R (R vem do Inglês *Range*), é possivelmente a mais utilizada para medir a dispersão de uma distribuição da característica a ser mensurada. A popularidade desta carta deve-se ao facto da sua facilidade de cálculos da amplitude e dos limites de controlo [34]. A amplitude, R , constitui uma estatística amostral de dispersão e resulta de se tomar o valor absoluto da diferença entre a maior e a menor observações numa amostra de dimensão n [33], ou seja, para o cálculo do limite central da carta R , \bar{R} , sabe-se que sendo x_1, x_2, \dots, x_n os valores retirados de n amostras, a amplitude R é a diferença entre o maior e o menor valor, ou seja, para cada grupo de amostras i , de $i = 1$ até m observações para cada amostra,

$$R_i = x_{max,i} - x_{min,i} \quad (2.25)$$

Calculando as amplitudes para todas as amostras, procede-se ao cálculo do limite central da carta das amplitudes como na equação 4.1.

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (2.26)$$

A linha central da CCQ das médias é obtida calculando, para cada conjunto de observações a média e com as m médias calculadas, calcular a média global:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (2.27)$$

Com \bar{R} e $\bar{\bar{x}}$ calculados, procede-se ao cálculo dos limites superiores e inferiores para a carta \bar{x} , segundo as seguintes equações:

$$LSC = \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{\bar{x}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (2.28)$$

$$LIC = \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{\bar{x}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (2.29)$$

$$LC = \mu = \bar{\bar{x}} \quad (2.30)$$

Como

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \quad (2.31)$$

Chega-se às novas equações para os limites superior e inferior da carta de controlo \bar{x} :

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (2.32)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (2.33)$$

Nas equações anteriores, o valor d_2 é um valor tabulado e depende do número de amostras, correspondendo à média da distribuição de amplitude relativa $W = \frac{R}{\sigma}$. Como neste caso $n = 5$. O valor A_2 depende também de n e vem também tabulado.

Já para os limites superior e inferior da carta de controlo de amplitude, estes calculam-se da seguinte forma:

$$LSC = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_4 \bar{R} \quad (2.34)$$

$$LIC = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_3 \bar{R} \quad (2.35)$$

$$LC = \bar{R} \quad (2.36)$$

Como

$$D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (2.37)$$

$$D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (2.38)$$

Chega-se às novas equações para os limites superior e inferior da carta de controlo de amplitude:

$$LSC = D_4 \bar{R} \quad (2.39)$$

$$LIC = D_3 \bar{R} \quad (2.40)$$

Nas equações anteriores, os valores d_3 , D_4 e D_3 encontram-se também tabulados.

3. **Cartas de média e desvio padrão, \bar{x} e σ :** Estas cartas, bastante parecidas com a apresentada no ponto (2), é utilizada quando o número de amostras n é, normalmente, superior a 8. Isto acontece já que, a sensibilidade da amplitude como estimador do desvio padrão do processo diminui, à medida que n aumenta. Assim, as cartas \bar{x} e σ são indicadas quando o número de amostras é superior a 8. Como tal, esta carta não foi utilizada neste trabalho.

Quando bem aplicadas, as cartas de controlo de qualidade tornam-se de facto numa ferramenta poderosa. Após escolher da melhor forma o tamanho da amostra e os limites LSC e LIC, resta saber interpreta-las corretamente. Segundo [5] é importante definir alguns padrões não naturais e analisá-los, sendo possível com eles averiguar se o processo se encontra ou não em controlo e, não estando, quais as possíveis causas. Esses padrões são então os seguintes [6]:

1. Cíclico: Oscilações previsíveis de altos e baixos que se podem repetir devido à presença e, depois, ausência de alguma causa em específico. As causas podem ser alterações de pressão, da temperatura, da tensão da rede, entre outros;
2. Deslocação: Alteração súbita do nível de comportamento do equipamento que indica uma alteração do processo, da manutenção ou do ajustamento na máquina;

3. Tendência: Alteração ao longo do tempo do nível de comportamento do processo que pode ser provocada por desgaste da ferramenta, envelhecimento ou manutenção não adequada do equipamento;
4. Fenómenos: Medições individuais significativamente diferentes umas das outras, podendo surgir pontos fora dos limites de controlo. As causas podem ser: danos acidentais, ajustamentos exagerados, avarias;
5. Misto: Demasiados pontos perto dos limites de controlo. Tal situação pode indicar um ajustamento muito exagerado de determinado componente.

As cartas de controlo são cada vez mais utilizadas a nível industrial como uma ferramenta para monitorização de processos, como por exemplo em [36] em que as cartas de controlo são utilizadas para estudar a variabilidade do rio Ebro, em Espanha, através de um índice de qualidade global. O intuito deste estudo era de identificar valores anormais no indicador de qualidade, recolhendo informação de vários sensores durante o ano de 2008. Concluiu-se que as cartas de controlo são de facto úteis na pesquisa e remoção de valores anormais na água.

Já em [37] é proposto um método de diagnóstico *online* para um motor que deteta desvios (variações) relativamente ao comportamento normal do motor. São provocadas neste estudo três tipos de falhas e chegou-se à conclusão que o método deteta falhas incipientes.

Em [38] as CCQ são utilizadas na indústria farmacêutica, tanto para lavar máquinas como para os próprios medicamentos. É estritamente necessário que os níveis de qualidade microbiológicos na água sejam regulados e neste artigo as cartas de Shewhart são utilizadas para esse fim e também como previsor para a qualidade da água no futuro. O tempo de recolha de dados foi de dois anos e foi utilizado, para interpretar a informação gerada, um *software* composto por pacotes (*packages*) estatísticos.

Como último exemplo da utilização destas cartas, em [39] são utilizadas todas as técnicas SPC como avaliação da produção de plástico para atingir uma melhoria cíclica contínua (*continual improvement process*, CIP). As CCQ não são sempre satisfatórias quando, por exemplo, o número de defeitos é pequeno. Surgiram, portanto, cartas adaptadas a partir destas, como por exemplo em [40] onde são estudados esquemas de controlo para qualidades acumuladas entre observações de defeitos, com o tempo necessário para se obter um número de falhas pré-determinado, devido ao facto de as cartas de controlo da qualidade não serem eficazes quando o número de defeitos se torna pequeno. Em [41], estudam-se também estratégias para definir os limites das cartas para manutenção preditiva (*Condition Monitoring*, CM), utilizando outras cartas baseadas nas de controlo tais como a carta WLC (*Weighted Loss function*) para monitorizar a média e variabilidade da característica. Cartas CCC-r (*Cumulative Count of Conforming*) foram aplicadas em moldes de injeção em [42], onde se verifica que há um número pequeno de itens não conformes e como tal, as cartas de controlo não são suficientes.

Foram também já estudadas possíveis combinações entre SPC e manutenção preventiva, como demonstrado em [43], onde se verifica que uma combinação entre uma carta de controlo da média,

\bar{x} , em conjugação com uma política de manutenção preventiva resultam numa redução de custos a nível de operação.

2.3.3 Manutenção e falhas

Se é importante monitorizar em tempo real o comportamento de características das máquinas, é importante também prevêê-los, observando possíveis tendências e manutenções necessárias nos equipamentos.

Vários tipos de falhas podem ocorrer num sistema industrial e dependendo do tipo de falha, abordagens diferentes podem ser tomadas sendo classificadas segundo [44] como manutenção corretiva (MC), preventiva (MP) ou preditiva (MPRE).

A manutenção corretiva é realizada apenas depois de haver uma falha, para fazer com que o sistema volte novamente à normalidade, exercendo as suas funções, daí ser chamada normalmente *fail-and-fix*. A manutenção preventiva é considerada das políticas de manutenção mais populares e envolve inspeções periódicas que são necessárias para manter o sistema a trabalhar com boa performance. Identificar o intervalo para a MP requer analisar a data das falhas e é determinado com base no tempo de serviço e a idade do componente/de todo o sistema. Para além disso, não leva em consideração a degradação das características do sistema quando são planeadas as atividades de manutenção, o que leva muitas vezes a manutenções desnecessárias e perda de capacidade de produção [45].

Comparando este tipo de manutenção com a MC, a MP reduz de modo eficaz o número de falhas inesperadas, havendo um custo acrescido na manutenção.

Mais recentemente surgiu a manutenção preditiva, também conhecida como *condition-based maintenance* e foi proposta como um novo método para ultrapassar as desvantagens das manutenções preventivas e corretivas. A ideia base deste tipo de manutenção é de realizar a manutenção no tempo correto, i.e., antes das falhas acontecerem. Nestes últimos anos tem havido bastante pesquisa relativamente à manutenção preditiva, começando esta mesmo a ser estudada nos anos 40. Antes de explicar realmente o que é a CBM, é importante explicar o comportamento de falhas num sistema.

Segundo [46, 47], um processo pode ser separado em três subsistemas onde se localizam falhas, como representado em 2.12, sendo eles os atuadores, o processo e sensores.

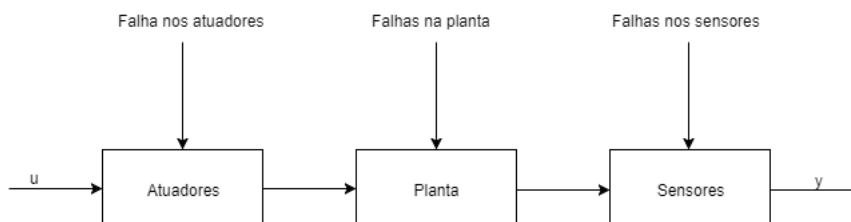


Figura 2.12: Falhas num sistema

Na imagem, u representa uma entrada no sistema e y uma saída. Dependendo do local onde ocorre uma falha, esta pode ser classificada como [46, 47]:

1. Falha no sensor;
2. Falha no processo (ou falha do sistema);
3. Falha no atuador.

As falhas podem ser descritas pela forma como variam no tempo, havendo três tipos diferentes [46, 47]:

1. Abrupta (*Step fault*): Representa uma falha instantânea, como por exemplo um componente que quebra;
2. Incipiente (*Drift*): Degradação lenta de componentes;
3. Intermitente: Falha que aparece e desaparece, como por exemplo uma falha de conexão.

Outra questão relativamente às falhas num sistema prende-se ao facto de estas estarem compreendidas temporalmente entre dois pontos. Na figura 2.13 a curva que representa o comportamento das falhas é denominada P-F e representa o comportamento da falha de um parâmetro [7]. P define o ponto em que a falha ocorre mas não é detetável. P_1 define o ponto em que a falha potencial é detetada e o ponto onde realmente esta acontece é o F. Os pontos entre P_1 e F são os pontos onde os algoritmos desenvolvidos devem ser colocados para identificar corretamente os estados intermédios entre P_2 e P_n . O tempo entre a falha potencial até esta realmente se gerar é o intervalo P-F e, como tal, todas as análises e manutenções têm que estar dentro deste intervalo para serem realmente eficientes. Segundo [7] há seis *CBM technology enablers*:

1. Diagnósticos: processo de encontrar a falha após ou no processo de ocorrência da falha no sistema;
2. Prognósticos: Processo de prever uma falha futura num sistema, analisando as condições de operação passadas e presentes ou monitorizando a taxa de desvio relativamente às condições normais do funcionamento do parâmetro, havendo dois desafios importantes neste contexto: predição do tempo até dado componente falhar ou tempo de vida útil de um componente ou estimação do valor de confiança ;
3. *Usage-based modeling*: Utilizado também para prever o tempo de vida útil de componentes de um sistema, requerendo testes e análises extensivas, havendo uma margem de erro grotesca;
4. *Data-Mining*: Processo utilizado quando há muita informação passada recolhida sobre determinado sistema. Nem toda a informação é útil e, como tal, este processo ajuda na recolha da mais importante e na criação do modelo, havendo quatro etapas diferentes: Preparação da informação, criação do modelo, validação do modelo e por fim, aplicação do modelo resultante;
5. Inteligência artificial: Desenvolvimento de algoritmos de raciocínio poderosos e técnicas de predição. O foco é, através das capacidades destes algoritmos, avaliar planos alternativos baseados em atributos e escolher a melhor sequência para atingir determinado objetivo. A IA foca-se também no desenvolvimento de algoritmos de *machine learning*;

6. *Open system architecture*: É um padrão para o fluxo de informações que ajuda na realização um sistema CBM de ponta a ponta.

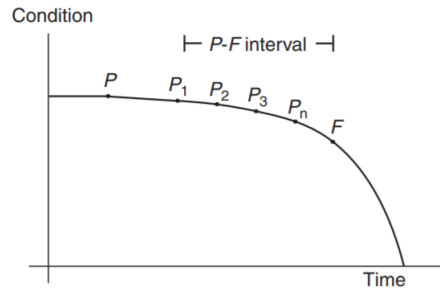


Figura 2.13: Evolução temporal de falhas num sistema [7]

Com a tentativa de substituição de manutenção preventiva e corretiva por preditiva, ou CBM, surgiram ao longo destes últimos anos vários estudos em diversas áreas, desde redes de distribuição de potência, fabrico de semicondutores, plantas nucleares e indústria automóvel. No entanto, é de referir que a manutenção preditiva é ainda muito limitada, muito devido às incertezas relativas ao tempo de vida dos equipamentos e custos elevados iniciais, por exemplo, em relação ao investimento em sensores para os sistemas. Enumeram-se de seguida alguns trabalhos relativamente a sistemas preditivos na atualidade.

Em [44], desenvolveu-se um método de manutenção preditiva para determinar o tempo ideal para realizar a manutenção num equipamento e este foi testado num semicondutor real. É aplicada regressão linear para prever a condição de saúde do *output* do equipamento a partir dos parâmetros operacionais de entrada. A utilização de um modelo linear permitiu a criação de um algoritmo para reduzir o número de parâmetros operacionais a ser monitorizados, utilizando *t-statistics*. Chegou-se a bons resultados comparativamente com a manutenção preventiva existente.

Já em [45] é desenvolvida uma política SUDM (*Sensory-updated degradation-based predictive maintenance*), que é um modelo estocástico em tempo contínuo cujas entradas são sinais de degradação adquiridos durante a operação com características de degradação dos componentes, fazendo sempre o *update* dos resíduos (RLD, *residual life distribution*).

Uma abordagem com *Data-Mining* para monitorizar turbinas eólicas é descrita em [48]. Estes algoritmos são utilizados para prever os estados das turbinas eólicas, tendo sido desenvolvidos modelos preditivos para falhas. Este processo passa por três fases: em primeiro lugar preveem-se falhas de qualquer tipo, com o intuito foi de prever uma falha específica e, em terceiro e último lugar, procede-se à identificação de falhas não detetadas. São testados vários algoritmos sendo que o mais eficiente foi o *Random forest algorithm*. Neste estudo, foram retiradas amostras de 10 em 10 segundos num período de 4 meses, utilizando um total de dezassete turbinas e mais de cem parâmetros.

Uma abordagem de prognóstico é abordada em [49] onde é utilizada a manutenção preditiva para prever o tempo de vida útil de componentes. É utilizado um modelo *skew-Wiener*, considerado mais flexível em comparação com os modelos estocásticos tradicionais. Neste caso teve-se

um conhecimento alargado de dados históricos e com essa informação, foi desenvolvido um algoritmo *online* para estimação de estados. Foram utilizadas aqui simulações de Monte Carlo aplicadas a máquinas elétricas rotativas, concluindo-se que a distribuição CSN (*closed skew normal distribution*) é mais eficiente relativamente à distribuição normal para criar um modelo de degradação de componentes. O perfil histórico de degradação e a distribuição CSN são considerados *inputs* para o modelo *skew-Wiener*, chegando-se a resultados bastante bons comparando com outros métodos preditivos.

Em [50] é descrito um modelo matemático de manutenção preditiva baseado em prognóstico, assumindo-se que o sistema é periodicamente revisto utilizando equipamentos de medição imperfeitos. Conclui-se neste estudo que a manutenção preditiva é muito mais eficiente em relação à manutenção corretiva.

Em [51] propõem-se um método preditivo para falhas incipientes em sistemas não lineares, sendo proposto um algoritmo de estimação de falhas e, ao mesmo tempo, o estado do sistema é estimado, utilizando um algoritmo MFE (*modified fault estimation*) baseado num filtro de partículas (PF). Os resultados foram testados utilizando um sistema de três tanques onde os resultados do sistema preditivo revelaram, para falhas aditivas, ser eficiente.

Outra técnicas preditiva baseada em prognóstico é a extrapolação. No artigo [52], são utilizadas técnicas de extrapolação e correlação entre falhas e vários parâmetros para a análise de padrões de falhas em *disk drives*, enumerando-se os fatores chave que afetam o tempo de vida útil destes componentes de computadores. Já em [53], métodos de extrapolação são propostos para estimar a trajetória de um avião em tempo real. A extrapolação é também utilizada para estimar falhas nos sistemas, como em [54], onde é previsto o número de falhas e é estimada a altura em que as falhas de facto ocorrem.

No caso em específico deste trabalho em que o parâmetro mensurado foi unicamente a condutividade elétrica, há apenas um parâmetro para realizar análises preditivas para falhas, o que não é de todo satisfatório. Sabe-se que o grau de desmineralização da água está intrinsecamente ligado à condutividade elétrica da água, mas esta última depende, por exemplo da temperatura e esta não foi mensurada. Portanto, a análise apenas com um parâmetro torna-se mais complexa pois os resultados finais podem não ser tão fidedignos relativamente ao estado do sistema. Como tal, optou-se neste trabalho por fazer uma análise do estado do sistema avaliando a evolução temporal da condutividade elétrica através de métodos de extrapolação.

Portanto, no caso concreto da máquina de desmineralização, que será o caso de estudo neste trabalho, é suposto que a água seja desmineralizada dentro de certos limites, como dito na secção 2.2.1, se esses limites superiores e inferiores foram ultrapassados, significa que a máquina não está a desmineralizar a água corretamente. E nesse caso, utilizar-se-iam os diagramas de causa efeito, que levariam em conta todas as situações que possivelmente seriam responsáveis por essa alteração. Tendo métodos de extrapolação a avaliar, em tempo real, a evolução temporal da condutividade elétrica e estabelecendo os limites mencionados em cima, ter-se-ia uma análise interessante de possíveis falhas no sistema.

Com a manutenção preventiva, o número de falhas é reduzido e a máquina fica, idealmente,

sempre a funcionar corretamente. Agora, medindo a condutividade elétrica à saída da máquina e observando o seu comportamento ao longo do tempo, se nenhum material for substituído, é normal que a máquina comece a reduzir a eficiência, querendo-se com isto dizer que o valor da condutividade elétrica começa a aumentar. Se se souber o limite superior que a condutividade elétrica poder ter para um bom funcionamento e se se prever qual é o dia em que esse valor será atingido, serão reduzidos custos a nível de manutenção. A extrapolação prevê, através dos valores anteriores retirados da condutividade elétrica, os possíveis valores futuros.

A extrapolação é então um processo de estimação de valores futuros através da análises de observações passadas [55]. Há vários métodos de extrapolação: linear, polinomial, exponencial, potencial, entre outros. A escolha do método ideal prende-se à análise criteriosa das observações anteriores e de suposições relativas à evolução temporal do parâmetro. Em [56] são considerados métodos para a análise de parâmetros quando a resposta de interesse é o tempo até alguma falha ocorrer, sendo que todos estes métodos são estatísticos. Entre eles, está presente a extrapolação. A regressão constitui um instrumento bastante útil para se proceder à extrapolação de tendências, através do método dos mínimos quadrados. Assim, na regressão entre duas variáveis, por exemplo, na regressão linear da variável Y sobre a variável X [57],

$$Y_i = \alpha + \beta X_i \quad (2.41)$$

Nesta equação, α é uma constante que representa a interceção da reta com o eixo das ordenadas e β representa o declive da reta. Substituindo na equação anterior a variável X pelo tempo, obtém-se uma regressão de tendência linear:

$$Y_i = \alpha + \beta T_i \quad (2.42)$$

Assim, o coeficiente de regressão de Y sobre T , β , é designado o coeficiente de tendência linear, que indica a variação da variável Y por unidade de tempo. Desta forma, define-se a extrapolação para um período futuro:

$$Y_{N+1} = \alpha + \beta T_{N+1} \quad (2.43)$$

Serão apresentados no 4 várias equações possíveis de extrapolação, e ir-se-à verificar que o melhor método para este caso de estudo em específico é o de extrapolação polinomial.

2.4 Conclusões

Numa altura em que a manutenção preditiva começa a ser cada vez mais apreciada, parece verdadeiramente interessante realizar um sistema completo onde seja incluída uma técnica SPC, tal como as cartas de controlo da qualidade, com um sistema preditivo que prevê falhas incipientes.

A escolha no leque disponível de técnicas preditivas reduziu-se drasticamente dado o facto de não haver disponível, para a realização desta dissertação, informação relativa a falhas anteriores na máquina de desmineralização bem como uma quantidade de dados exaustiva do sensor de condutividade elétrica. Como tal, optou-se por um método que conta apenas com informação atual que, aliado às cartas de controlo, resultarão num método consistente, apresentado nos dois capítulos que se seguem.

Em suma, serão implementadas cartas de controlo da qualidade do tipo média e amplitude para avaliar, dos valores disponíveis da condutividade elétrica, se se evidenciam situações fora do controlo. De seguida, implementar-se-ão cartas de controlo da qualidade do tipo valores individuais e amplitude móvel, em tempo real. Por fim, serão utilizadas técnicas de extrapolação com os valores disponíveis da CE e implementar-se-hão estas técnicas para controlo em tempo real.

Desta forma ter-se-á uma forma de avaliar possíveis falhas no futuro e manutenções necessárias na máquina de desmineralização.

Capítulo 3

Sistema de monitorização

Neste capítulo apresenta-se o sistema de monitorização realizado no âmbito desta dissertação. Este sistema teve o objetivo de ter um parâmetro de uma máquina a ser monitorizado. Neste capítulo expõem-se, em primeiro lugar, os requisitos para o sistema, estes que foram definidos pela empresa, em 3.1. No subcapítulo 3.2 apresenta-se a solução proposta para o sistema, desde a base de dados até à interface gráfica. Segue-se um subcapítulo relativo à implementação, 3.3 e por fim, em 3.5 são retiradas as conclusões sobre o sistema de monitorização.

3.1 Análise de requisitos

Os quatro requisitos impostos para o sistema de monitorização foram:

1. **Monitorização dos parâmetros em tempo real:** O objetivo foi de se poder visualizar o comportamento de determinado parâmetro em tempo real. Todo o sistema, ou seja, desde um sensor até à interface gráfica, há atrasos na receção dos dados, nunca sendo instantâneo. Mas o interesse da empresa foi de, na interface, apresentar os dados numa cadência de, por exemplo, cinco em cinco segundos. Como tal, não foi necessário ponderar soluções na eventualidade de atrasos de receção de alguns milissegundos. A solução para este requisito passou por criar um sistema onde é possível escolher a frequência com que os dados são recebidos e mostrados na interface gráfica.
2. **Sistema expansível:** Como já foi mencionado anteriormente, o intuito da empresa é de, no futuro, ter todos os parâmetros de todas as máquinas a serem monitorizados. Como tal foi importante dimensionar um sistema que torne fácil adicionar máquinas e parâmetros diferentes.
3. **Introdução de limites para cada parâmetro:** Com este sistema de monitorização, a empresa pretendia obter informação, em tempo real, do estado de controlo de cada parâmetro e da máquina a este associado. Assim, foram criados limites superiores e inferiores para cada parâmetro que são uma primeira análise para o estado de controlo de cada parâmetro. Estes

limites são introduzidos pelo utilizador do sistema de monitorização. No caso desses limites serem ultrapassados, foram dimensionados avisos para informar o utilizador.

4. **Interface gráfica em web:** O último requisito para o sistema de monitorização foi criar-lo num *software* que possibilitasse a sua utilização via *web*, de modo a facilitar a utilização do sistema a partir de qualquer dispositivo e qualquer lugar da fábrica. Foi também importante criar uma interface simples, apelativa e facilmente manuseável, com o objetivo de ser de fácil utilização para todos os utilizadores do sistema. Na interface gráfica, a página principal teria, idealmente, as máquinas a ser monitorizadas separadas por zonas da fábrica.

3.2 Solução proposta

Na figura 3.1 é apresentado um esquema simplificado da arquitetura do sistema proposto.

Para um parâmetro de uma máquina ser monitorizado em tempo real, é necessário, em primeiro lugar, preencher dois formulários presentes na interface gráfica do sistema de monitorização, um para o parâmetro e outro para a máquina em questão. Quando estes formulários são submetidos, esta informação fica armazenada na base de dados. A comunicar com a base de dados encontra-se também um programa que recebe informação da máquina que se quer monitorizar. Neste, é necessário introduzir o IP e o endereço de memória do parâmetro de interesse, ficando a máquina apta, desde esse momento, a enviar informação para a base de dados.

Na imagem, a caixa denominada "parâmetro" representa um valor a ser enviado do PLC da máquina, em tempo real. Este valor fica guardado na base de dados e desta é passado para o sistema de controlo da qualidade, para dimensionamento das cartas de controlo e para a interface gráfica do sistema de monitorização. Dependendo da frequência escolhida para tal, o valor recebido na interface gráfica irá ser atualizado, ficando sempre os valores anteriores armazenados na base de dados. Este valor servirá também para a elaboração de gráficos em tempo real. Todos os resultados representados na interface gráfica ficarão também armazenados na base de dados. Nas próximas secções deste subcapítulo é explicado como se dimensionou o sistema de monitorização de forma a adicionar máquinas e parâmetros e o funcionamento deste sistema.

3.2.1 Adicionar máquinas ao sistema

Como dito previamente, para se adicionar uma máquina é necessário preencher-se um formulário, este que está representado na figura 3.2. É necessário introduzir o nome, nome técnico, zona e descrição (opcional).

O campo do formulário "zona" está relacionado com o tipo de máquina e com a zona da fábrica onde esta se encontra. Foi introduzido devido ao facto de ter sido pedido, para a interface gráfica, de haver separação das máquinas pelas zonas em baixo enumeradas, dado serem as zonas onde se encontram as máquinas:

1. Produção química
2. Transformação

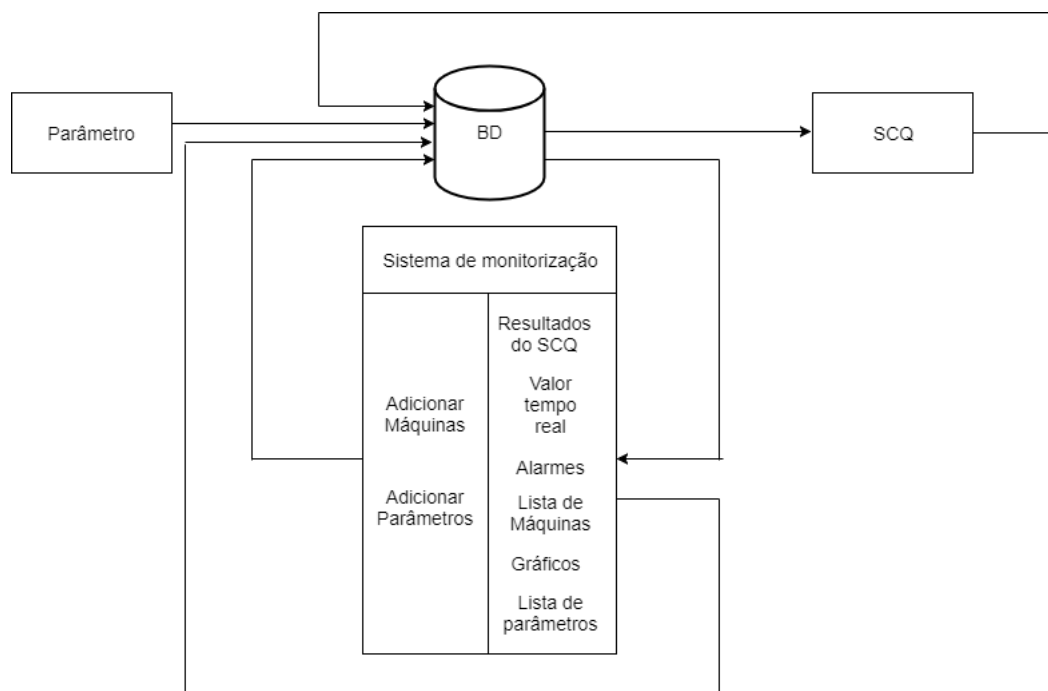


Figura 3.1: Esquema do sistema de monitorização

S.M. Flexipol
HOME
DASHBOARD
PROFILE
ADICIONAR PARÂMETRO
ADICIONAR MÁQUINA
LISTA DE MÁQUINAS
LISTA DE PARÂMETROS
LOGOUT

Adicionar Máquina

Preencha o formulário e submeta a informação da máquina, e de seguida navegue para Adicionar parâmetro para adicionar os parâmetros que quer monitorizar na respetiva máquina

Nome

Inserir nome do parâmetro

Nome banal da máquina

Nome técnico

Inserir nome técnico

Nome Técnico da máquina

Selecionar zona em que a máquina está inserida

Inserir descrição da máquina

SUBMITER

Figura 3.2: Formulário para adicionar uma máquina ao sistema de monitorização

3. Loopers
4. Expedição
5. Administrativos
6. Armazém

Apresenta-se na figura 3.3 o painel principal da interface gráfica. Foram adicionadas máquinas só para exemplificar esta situação. Pode-se verificar que cada máquina está inserida na interface de

acordo com a zona.

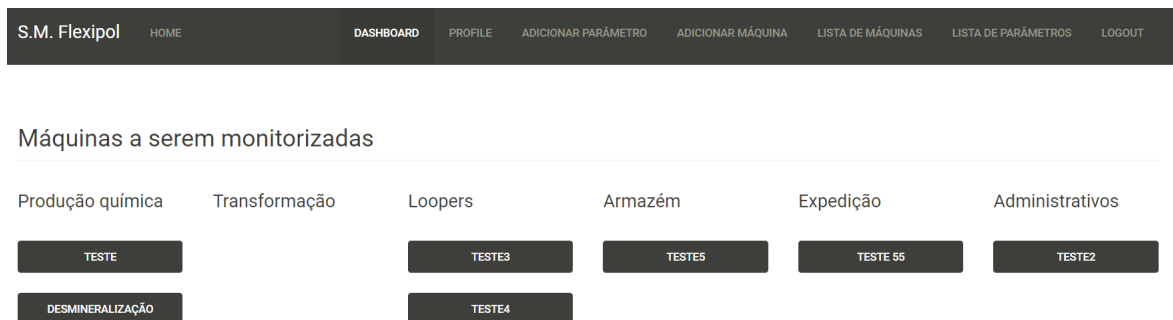


Figura 3.3: *Dashboard* com todas as máquinas adicionadas ao sistema a ser monitorizadas

Apresenta-se também uma lista de máquinas na interface gráfica que possibilita apagar máquinas do sistema de monitorização, como exemplificado na figura 3.4, para uma máquina denominada "teste2". Visualizam-se também os parâmetros associados a cada máquina.

Nome	Nome técnico	Zona	Parametros	Apagar
teste2	Teste de utilização 2	Administrativos	Param2	TESTE2

Figura 3.4: Exemplo de uma máquina listada

3.2.2 Adicionar parâmetros ao sistema

Dado o facto de máquinas diferentes poderem ter o mesmo parâmetro, foi necessário criar outro formulário para adicionar parâmetros (figura 3.5) e através deste, associa-los à máquina que se pretende monitorizar, como representado na figura 3.6. De seguida são preenchidos os restantes campos: nome, nome técnico (nome do sensor), unidade de medida, valor normal de funcionamento, dois limites superiores e dois inferiores, e por fim descrição (opcional).

Neste formulário insere-se a unidade de medida para, na interface gráfica, quando se observa o parâmetro em tempo real, se saber automaticamente as unidades deste, como representado na figura 3.7. Em título de exemplo, foi adicionada uma máquina ao sistema com o nome "teste" que tem, neste momento, dois parâmetros a ser monitorizados. Os valores que aparecem no campo "Valor em tempo real" foram colocados somente para mostrar o funcionamento do sistema. A opção "Gráficos" mostra para cada parâmetro um gráfico com os dez últimos valores obtidos monitorizados, estando sempre a ser atualizado.

Como se pode verificar pela figura 3.5 é necessário introduzir dois limites superiores e dois inferiores no formulário respetivo à introdução no sistema de um parâmetro. Estes limites são escolhidos de acordo com o parâmetro em questão, de modo a verificar se este se encontra ou não numa situação de controlo, cumprindo os limites pré-definidos. É através destes que são ativados alarmes, no caso do valor real a ser monitorizado os ultrapassar. Os primeiros limites, denominados "Limites admissíveis" são utilizados para indicar uma situação anormal, mas sem

S.M. Flexípol HOME DASHBOARD PROFILE **ADICIONAR PARÂMETRO** ADICIONAR MÁQUINA LISTA DE MÁQUINAS LISTA DE PARÂMETROS LOGOUT

Adicionar parâmetro

Preencha o formulário e submeta a informação do parâmetro

Selecionar maquina

Nome

Nome técnico

Unidade

Valor normal de funcionamento

Limite superior admissível

Limite inferior admissível

Limite superior NÃO admissível

Limite inferior NÃO admissível

Inserir descrição do parâmetro

SUBMITER

Figura 3.5: Exemplo de parâmetro inserido no sistema de monitorização

Selecionar maquina

- Teste
- teste2
- Teste3
- teste4
- teste5
- Teste 55
- Desmineralização**

Figura 3.6: Associação de uma máquina a parâmetro no formulário do sistema

demasiado perigo para o sistema. No caso do valor real monitorizado os ultrapassar, surgirá na interface gráfica um aviso, como representado na figura 3.8 e os segundos limites, "Limites não admissíveis", são limites que revelam que o parâmetro está em mau estado, sendo que os valores impostos neste limite são supostamente bastante elevados para significar que algum componente está bastante danificado, um sistema que não está a funcionar, surgindo a informação na interface representada na figura 3.9. Quando surge a informação representada na figura 3.9, o sistema fica

S.M. Flexipol HOME DASHBOARD PROFILE ADICIONAR PARÂMETRO ADICIONAR MÁQUINA LISTA DE MÁQUINAS LISTA DE PARÂMETROS LOGOUT					
Maquina Teste					
Parâmetro	Valor em tempo real	Unidade	Estado	Gráficos	Mostrar amostras
Velocidade	20	m/s	Normal	<input type="button" value="VER"/>	<input type="button" value="VER"/>
Parâmetro	Valor em tempo real	Unidade	Estado	Gráficos	Mostrar amostras
Angulo	200	°	Normal	<input type="button" value="VER"/>	<input type="button" value="VER"/>

Figura 3.7: Máquina "teste" e respetivos parâmetros a serem monitorizados

bloqueado, desbloqueando apenas quando os valores voltarem à normalidade. Estes limites são definidos pelo utilizador. Ambas as figuras representativas das situações mencionadas acima são meramente exemplificativas e para as obter foram alterados, através da base de dados, os valores reais mensurados.

Alerta na maquina Teste no parametro Angulo

Figura 3.8: Alarme de "alerta" na máquina "teste" e parâmetro "ângulo"

Perigo na maquina Teste no parametro Angulo

Figura 3.9: Alarme de "perigo" na máquina "teste" e parâmetro "ângulo"

Depois do parâmetro ficar inserido no sistema, tal como no caso das máquinas, está disponível no sistema uma lista de parâmetros [3.10](#).

Nome	Nome Técnico	Unidade	Apagar Parâmetro
Angulo	Angulo corte	°	<input type="button" value="ANGULO"/>

Figura 3.10: Exemplo de parâmetro adicionado ao sistema

3.2.3 Adicionar utilizadores ao sistema

O terceiro formulário existente no sistema de monitorização está destinado ao registo de novos utilizadores. Devido ao facto de o sistema ter sido criado, como pedido, em *web*, para desta forma ser acessível em qualquer local da fábrica, foi necessário adicionar um modo de controlar quem tem acesso ao sistema de monitorização. Criou-se como tal, um registo para utilizadores. É necessário, como se pode verificar pela figura [3.11](#), inserir o nome, nome de utilizador (*username*), e-mail e palavra-passe (*password*). Para segurança do utilizador, toda a informação guardada na base de dados fica encriptada.

S.M. Flexipol HOME LOGIN REGISTER

Register

Name

Username

Email

Password

SUBMIT

Figura 3.11: Formulário para adicionar utilizadores ao sistema

3.2.4 Base de dados

Como mencionado nas secções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, quando se adicionam ao sistema máquinas, parâmetros e utilizadores, toda a informação fica guardada numa base de dados. O modelo entidade relação desta está representado na figura 3.12.

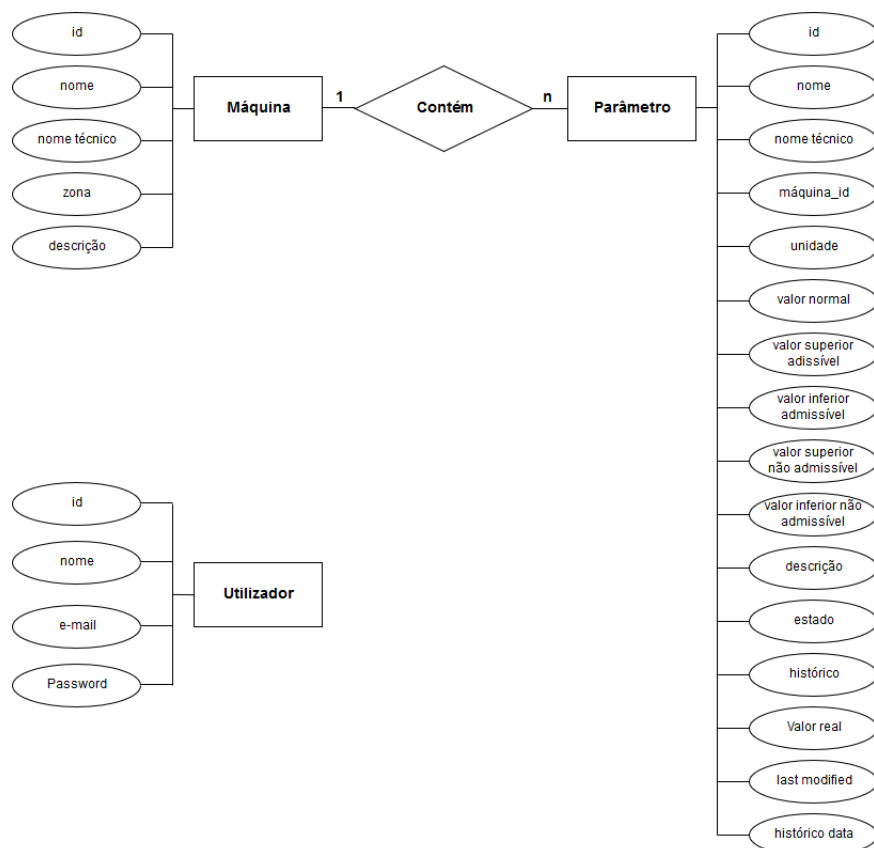


Figura 3.12: Modelo entidade relação

Criaram-se, portanto, três estruturas diferentes: uma para máquinas, outra para parâmetros e outra para utilizadores. A estrutura para as máquinas está representada na figura 3.13. Pode-se verificar que toda a informação que se preenche no formulário fica disponível.

>	(5) ObjectId("59282e68eefedf2958abc2ae")	{ 6 fields }
>	(6) ObjectId("592d2d8dee311408a42b53e1")	{ 6 fields }
▼	(7) ObjectId("593d9023cfc7852b24d67e15")	{ 6 fields }
	_id	ObjectId("593d9023cfc7852b24d67e15")
	nome	Desmineralização
	nomeTecnico	DSM
	zona	pquim
	descricao	
	_v	0

Figura 3.13: Exemplo de máquina inserida na base de dados

O mesmo acontece quando se adicionam parâmetros, como se pode verificar em 3.14. Nesta imagem verifica-se que existem mais alguns valores para além dos que é necessário preencher no formulário referente a um parâmetro. A variável "maquina_id" associa o parâmetro que está a ser adicionado a uma máquina. Isto acontece já que o mesmo parâmetro pode estar presente em várias máquinas. Segue-se a variável estado. Esta foi adicionada apenas como indicativo do estado do parâmetro. Este pode ser "normal", se estiver dentro dos limites definidos para o parâmetro ou "anormal", no caso do valor em tempo real ultrapassar os limites pré-definidos. A variável "valorReal" representa o último valor enviado pelo PLC e que chegou à base de dados. Associado a este valor apresenta-se uma variável denominada "lastModified", esta que apresenta a data em que chegou este último valor. As variáveis "historico" e "historicoData" são vetores que guardam os antigos valores das variáveis "valorReal" e "lastModified". Estes valores serão utilizados depois na realização das cartas de controlo da qualidade, para o sistema de controlo da qualidade.

>	(7) ObjectId("5935192660c440385c4f85fa")	{ 16 fields }
>	(8) ObjectId("593d906ecfc7852b24d67e18")	{ 16 fields }
▼	(9) ObjectId("594a3cfd2fbdd221cc8bfae6")	{ 17 fields }
	_id	ObjectId("594a3cfd2fbdd221cc8bfae6")
	nome	Conductividade elétrica
	nomeTecnico	CM-230
	maquina_id	ObjectId("594a3ccd2fbdd221cc8bfae1")
	InputUnidade	uS/cm
	valorNormalInput	50
	valorSupAdm	100
	valorInfAdm	0
	valorSupNAdm	300
	valorInfNAdm	0
	descricao	Medidor de condutividade elétrica para máquina de ...
	estado	Normal
>	historico	[1345 elements]
>	historicoData	[1345 elements]
	valorReal	194
	_v	1345
	lastModified	2017-06-23 15:36:58.281Z

Figura 3.14: Associação de uma máquina a um parâmetro no formulário do sistema

3.3 Implementação

A implementação do sistema de monitorização foi realizada através do *software open-source* MEAN (MongoDB, Express, AngularJS, NodeJS), dado ser um *software* livre e com apenas uma linguagem de programação: JavaScript. Este é destinado à criação de aplicações *web* e *web sites* dinâmicos. Este divide-se em quatro componentes [58]:

1. MongoDB: Base de dados NoSQL [59], isto é, trata-se de uma base de dados que providencia um mecanismo de armazenamento não estruturado [60]. Esta base de dados organiza a informação através de documentos. Os documentos estão dentro de coleções. Em título de exemplo, observando a figura 3.14, o que está representado é um documento, identificado pelo seu `_id` numa coleção de parâmetros. Neste trabalho, há três coleções diferentes: uma para parâmetros, outra para máquinas e outra para utilizadores e, dentro de cada coleção, estão os vários documentos. Quando se apresentaram as imagens relativas à base de dados, mais precisamente à organização da coleção dos parâmetros e máquinas, surgiram, como se pode visualizar, em 3.13 e 3.14 dois atributos novos para cada documento: `"_id"` e `"_v"`. O `"_id"` é um atributo dado a cada documento pelo MongoDB. Não há dois `"_id"` iguais e estes são utilizados em várias funções desta base de dados para efeitos de procura, adição, remoção.

O `"_v"` é denominado *version key* e é uma propriedade dada a cada documento quando este é criado através do Mongoose, uma ferramenta que facilita a utilização da base de dados.

2. Express: *Software* que estabelece a ligação entre o *front-end* da aplicação e o *back-end*.
3. AngularJS: *Software* para realização do *front-end* do sistema de monitorização, ou seja, a interface gráfica.
4. NodeJS: *Back-end* do sistema de monitorização onde se encontra o servidor do sistema que comunica com a base de dados. Neste definiu-se a conexão com a base de dados e a ligação ao servidor da empresa.

A conexão entre o PLC e o sistema de monitorização foi realizada utilizando o programa Visual Studio e a linguagem de programação C#, dado o facto de, na empresa, ter sido este o programa utilizado anteriormente noutras aplicações. Neste definem-se os IPs das máquinas e os endereços de memória dos parâmetros que se quer monitorizar. Os valores, em tempo real, dos parâmetros ficam guardados numa variável criada. Existe um pacote criado para C# que permite realizar uma série de funções entre C# e MongoDB. Através de algumas funções desse pacote, os valores dessa variável foram transmitidos para a base de dados, para a coleção dos parâmetros, variável `"valorReal"`.

3.4 Resultados

Para testar o sistema de monitorização e retirar os valores da condutividade elétrica para o sistema de controlo da qualidade, adicionou-se ao sistema a máquina de desmineralização e, como parâmetro, a condutividade elétrica. Definiu-se que o valor seria atualizado na interface gráfica de três em três segundos mas alterou-se de seguida esta frequência para cinco em cinco segundos. Definiram-se também os limites superiores e inferiores para o parâmetro. Como mencionado no capítulo 2, secção 2.2.1, um valor típico de água desmineralizada é de $2\mu S/cm$. Com base nesta informação e contactando alguns engenheiros da empresa, definiram-se como limite superior admissível $8\mu S/cm$ e como limite inferior $0\mu S/cm$. Para este parâmetro não há limite inferior não admissível mas considerou-se um limite superior não admissível de $20\mu S/cm$. Este valor foi escolhido pois significa que a água não está minimamente a ser desmineralizada com sucesso, o que pode significar de facto alguma falha num sensor, atuador ou mesmo na planta. A condutividade elétrica esteve a ser monitorizada durante, sensivelmente, duas semanas e nunca demonstrou, no horário de trabalho, ou seja, na altura em que a máquina este a funcionar, um valor superior a qualquer um dos dois limites, o que significa que a máquina está com bom funcionamento, a desmineralizar corretamente a água. Fora do horário de trabalho, para limpeza dos filtros da máquina, a corrente da água é revertida e os valores da condutividade elétrica elevam-se bastante, pois passa pelo sensor água potável da companhia, motivo pelo qual o sistema só esteve a monitorizar enquanto a máquina estava mesmo a desmineralizar a água.

3.5 Conclusões

Foi desenvolvido, de raiz, um sistema de monitorização, em *web*, que no final, ficou a monitorizar corretamente a condutividade elétrica, parâmetro de uma máquina de desmineralização da empresa, onde se verificou que, durante duas semanas, a água esteve a ser desmineralizada corretamente, pois não foi registada nenhuma ultrapassagem do valor da condutividade elétrica em relação aos limites estabelecidos, no horário de trabalho.

O sistema foi feito com interface gráfica em *web*, para ser mais fácil aceder a este em qualquer ponto da fábrica e em qualquer computador. É facilmente expansível, ou seja, máquinas, parâmetros e utilizadores são adicionados ao sistema de forma simples e intuitiva e mal são adicionados, os parâmetros começam logo a ser monitorizados e os seus valores a ser guardados na base de dados e a ser representados na interface gráfica e nos respetivos gráficos. Os limites superiores e inferiores para cada parâmetro são escolhidos pelo utilizador. Os requisitos impostos foram, portanto, todos cumpridos com sucesso.

Capítulo 4

Sistema de controlo da qualidade

O sistema de controlo da qualidade é composto por dois tipos de análise: primeiro, são utilizadas cartas de controlo da qualidade e em segundo lugar, é utilizado um método de extrapolação, numa tentativa de gerar uma equação representativa da evolução da condutividade elétrica ao longo do tempo.

4.1 Cartas de Controlo da Qualidade

Depois do sistema de monitorização estar finalizado, com a condutividade elétrica da máquina de desmineralização a ser monitorizada, procedeu-se à elaboração de cartas de controlo da qualidade para melhor compreender a evolução deste parâmetro ao longo do tempo, querendo-se com isto dizer que se quer compreender se o sistema se encontra ou não numa situação de controlo, primeiro com os valores da condutividade já obtidos e depois, em tempo real.

4.1.1 Análise de requisitos

O intuito da implementação das cartas de controlo de qualidade neste trabalho deve-se ao facto de se poder, desta forma, monitorizar o estado de controlo dos parâmetros das diferentes máquinas. Foram, durante duas semanas, retirados valores desse parâmetro.

Para um melhor auxílio ao sistema de monitorização, as cartas de controlo criadas foram:

1. cartas de controlo de média e amplitude com dados recolhidos durante duas semanas;
2. cartas de controlo de valores individuais e amplitude móvel com o intuito de se monitorizar este parâmetro em tempo real.

Os requisitos para as CCQ foram então os seguintes:

1. Avaliar os dados da condutividade elétrica e escolher, para as cartas de controlo de média e amplitude, quantos grupos de amostras retirar e quantas amostras por grupo;

2. Executar as cartas de controlo de média e amplitude com os dados já disponíveis na base de dados. Neste caso, é estritamente necessário escolher bem os valores, i.e., quantos valores por hora, por dia, para desta forma obter informação coerente sobre toda a distribuição. Após esta análise com as cartas de média e amplitude ser realizada, interpreta-las e verificar se a utilização das cartas de controlo da qualidade se adequa ao processo em questão. Interpretar as CCQ e guardar os resultados na base de dados para, deste modo, proceder ao envio destes para o sistema de monitorização;
3. Realização das cartas de controlo em tempo real, tendo em vista a expansibilidade para outros parâmetros. Ir interpretando constantemente as cartas e, em caso de alguma anomalia, enviar novamente o resultado para o sistema de monitorização.

4.1.2 Solução proposta

Depois da análise de requisitos, começou-se, em primeiro lugar, por analisar os dados sobre a condutividade elétrica. O tempo de recolha destes foi relativamente curto, de duas semanas, dado o facto de não haver histórico do parâmetro. Foram recolhidas amostras de três em três e depois de cinco em cinco segundos no horário de trabalho. Durante algumas horas, a máquina de desmineralização encontra-se em funcionamento e, ao fim do dia, o processo é revertido para limpeza dos filtros. Como tal, o estudo foi focado nas horas em que a máquina está ligada e a desmineralizar a água, sendo este período das nove horas da manhã até às seis horas da tarde, aproximadamente. Os valores recolhidos da condutividade elétrica estão representados no gráfico 4.1. No eixo das ordenadas apresenta-se a condutividade elétrica, em $\mu S/cm$ e no eixo das abcissas o número de amostras. Apresenta-se este gráfico para se poder verificar que os valores obtidos da condutividade elétrica toma valores bastante constantes, apesar da grande variabilidade. A azul estão representados os valores retirados e a cor-de-laranja representa-se a média da distribuição, com o valor de aproximadamente 2,04, o que é plausível pois, como mencionado no capítulo 2, os valores de condutividade elétrica para água desmineralizada rondam os $2\mu S/cm$.

Após se verificar que os valores da condutividade se mantêm, ao longo do tempo, constantes, restou escolher quantas amostras e o tamanho de cada para realizar as cartas de controlo de média e amplitude. Dado o facto de os dados terem sido retirados durante pouco tempo, foi utilizado um $n = 5$ e, para cada grupo de amostras, foram retirados 20 valores, $m = 20$, ou seja, cinco leituras para vinte amostras. O tamanho das amostras foi assim escolhido dado que, na literatura, é usual utilizar amostras destas dimensões.

Foram realizadas três análises. Para as três, os valores de condutividade elétrica foram retirados de cinco dias diferentes: 22/Junho, 26/junho, 30/Junho, 2/Julho e 4/Julho e, por dia, escolheram-se três horas para analisar. Sendo que uma hora tem sessenta minutos, foram retirados valores de três em três minutos para perfazer os vinte valores de cada amostra. As três horas escolhidas para a realização das cartas foram: quatro horas da tarde, nove horas da manhã e seis horas da tarde. Os valores retirados para a primeira análise estão disponíveis no anexo C, para

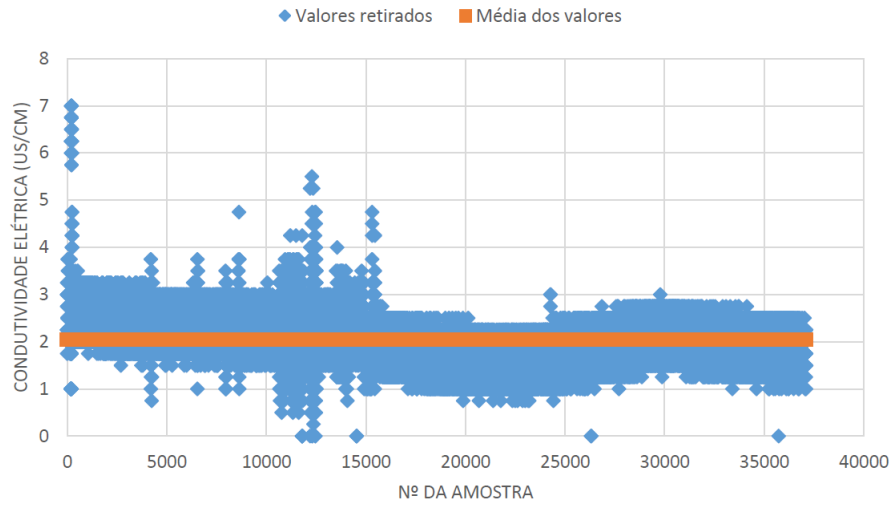


Figura 4.1: Dados da condutividade elétrica

a segunda no anexo D e para a terceira no E. Nestes, podem-se verificar os valores digitais que foram convertidos nos respetivos valores de condutividade elétrica, em $\mu S/cm$.

Começou-se a análise para as quatro horas da tarde e procedeu-se, de seguida, ao cálculo dos limites para ambas as cartas (média e amplitude). Calculou-se, em primeiro lugar, para o mesmo minuto, a amplitude, R . Para tal, como já mencionado em 2.3.2, para cada minuto obtiveram-se os valores máximos e mínimos de cada amostra, entre os cinco dias diferentes e de seguida, calculou-se a diferença, obtendo desta forma os valores de amplitude. Com estes valores calculados, procedeu-se ao cálculo de \bar{R} , da seguinte forma:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{20}}{20} \Leftrightarrow \bar{R} \approx 1,061 \quad (4.1)$$

Calculou-se depois a linha central da carta de controlo das médias, esta que é calculada através dos cálculos das médias para cada amostra, como definido em 4.2:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{20}}{20} \Leftrightarrow \bar{\bar{x}} \approx 1,789 \quad (4.2)$$

O valor calculado em 4.2 é o limite central da carta das médias.

Depois destes dois limites centrais calculados, procedeu-se ao cálculo dos limites superiores e inferiores através das equações disponíveis na secção 2.3.2. Para a carta das médias, os limites foram então os seguintes:

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 1,789 + 0,577 \cdot 1,0619 \approx 2,402 \quad (4.3)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 1,789 - 0,577 \cdot 1,0619 \approx 1,176 \quad (4.4)$$

Para a carta das amplitudes, os limites encontrados foram:

$$LSC = D_4 \bar{R} = 2,114 \cdot 1,062 \approx 2,245 \quad (4.5)$$

$$LIC = D_3 \bar{R} = 0 \cdot 1,0619 = 0 \quad (4.6)$$

Resumem-se, na tabela 4.1, os limites para as cartas de controlo de média e amplitude, para a primeira análise, das quatro da tarde.

Tabela 4.1: Limites para as cartas de média e amplitude

Carta	LIC	LC	LSC
Média (\bar{x})	1,176	1,789	2,402
Amplitude (R)	0	1,061	2,245

Depois do cálculo dos limites, procedeu-se à elaboração das cartas de controlo da qualidade de média e amplitude, representadas nas figuras 4.2 e 4.3, respetivamente. Para a segunda análise

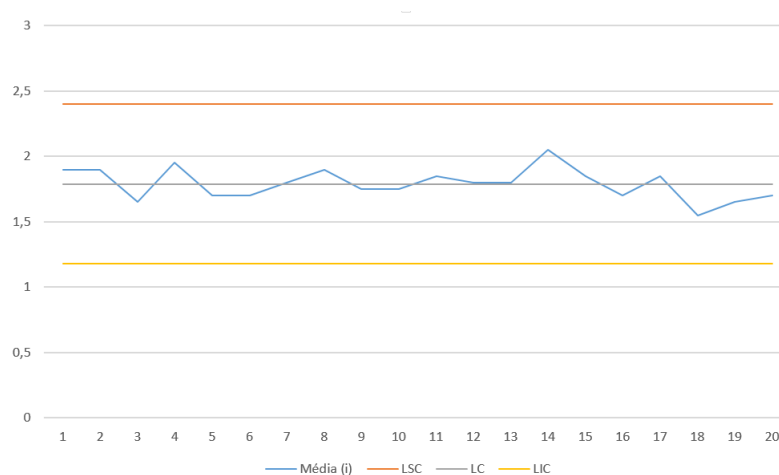


Figura 4.2: Carta das médias para as quatro horas da tarde

e terceira, os cálculos realizados foram os mesmos, pelo que não se apresentam. Estão mostrados na tabela 4.2, para as três horas diferentes e para as duas cartas, de média e amplitude, os vários limites calculados superior, central e inferior. As cartas de controlo da qualidade de média e amplitude para as nove horas da manhã estão representadas nas figuras 4.4 e 4.5 e para as seis da tarde representadas em 4.6 e 4.7.

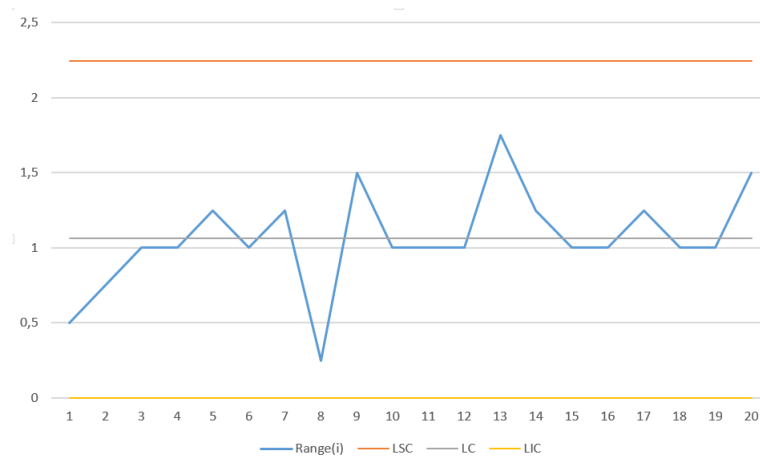


Figura 4.3: Carta das amplitudes para as quatro horas da tarde

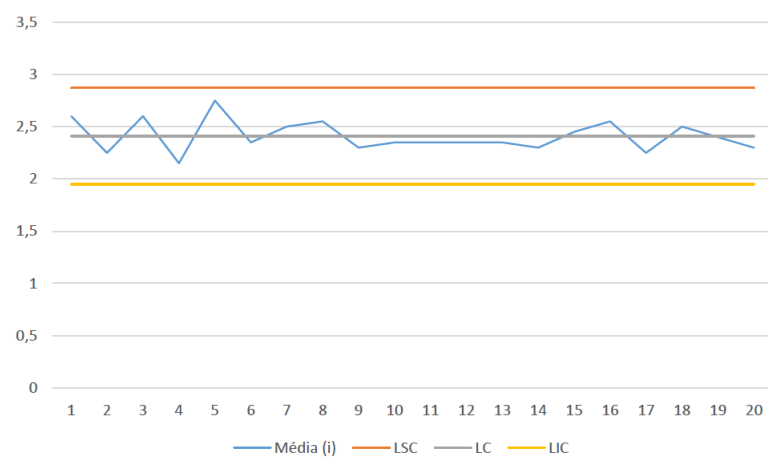


Figura 4.4: Carta das médias para as nove horas da manhã

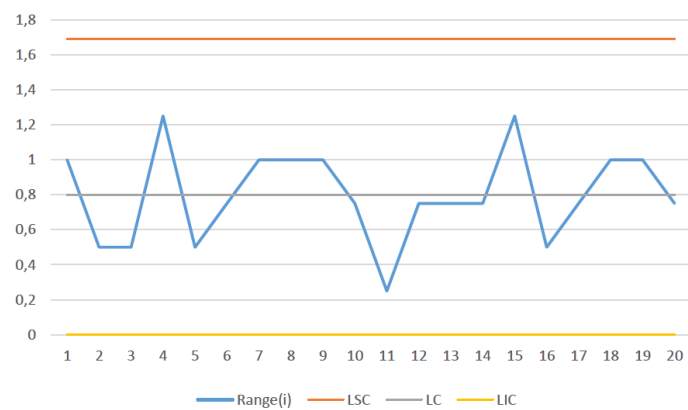


Figura 4.5: Carta das amplitudes para as nove horas da manhã

Como foi previamente dito, intuito principal da utilização das cartas de controlo da qualidade é através destas, monitorizar o processo em tempo real, sendo que a abordagem anterior exposta

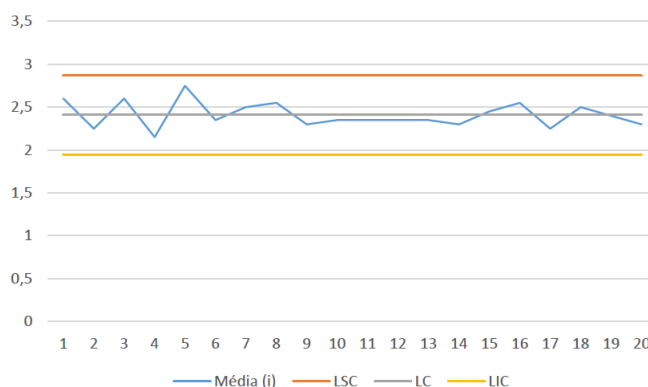


Figura 4.6: Carta das médias para as seis horas da tarde

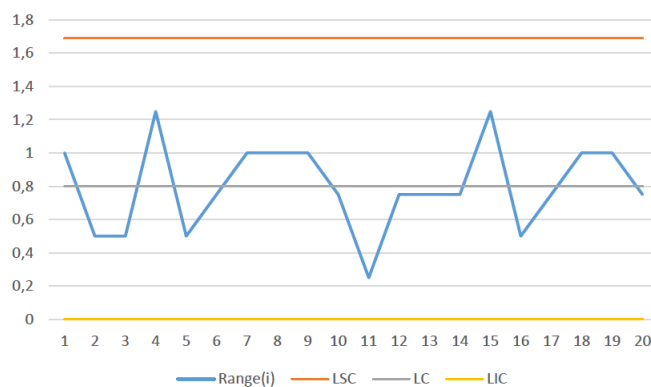


Figura 4.7: Carta das amplitudes para as seis horas da tarde

serviu só para averiguar se, dos valores retirados durante as semanas de aquisição, o parâmetro a ser mensurado evidenciava algum tipo de anomalia ou se se encontrava numa situação ideal de controlo. A discussão e interpretação dos resultados obtidos a partir das cartas para as três horas de funcionamento da máquina encontram-se na subsecção 4.1.4 e as ferramentas utilizadas para a sua implementação em 4.1.3.

Para auxílio à monitorização em tempo real, como foi dito no capítulo 2, utilizaram-se cartas de valores individuais e amplitude móvel. Estas cartas foram utilizadas devido ao facto de a sua implementação ser mais simples e, para tempo real, depois de revista a literatura, terem aparentemente resultados interessantes.

Tabela 4.2: Valores dos limites superiores, centrais e inferiores para as cartas das médias e amplitudes para as três horas em análise

	16h00		9h00		18h00	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude
LSC	2,402	2,245	3,354	2,219	2,870	1,690
LC	1,790	1,062	2,749	1,049	2,409	0,800
LIC	1,176	0	2,143	0	1,947	0

Estas cartas funcionam então da seguinte forma: Como dito anteriormente, inicialmente a frequência com que os dados estavam a ser retirados da condutividade elétrica era de três em três segundos, passando depois para um período de aquisição de cinco segundos. Para estas cartas de controlo da qualidade, os valores da condutividade elétrica foram encaminhados para uma fila com esta última frequência.

Uma fila é uma estrutura de dados que admite a inserção de dados pela "cauda" e a remoção de dados pela "cabeça", sendo do tipo FIFO (*First in, First Out*). Em título de exemplo para melhor compreensão, supõem-se que se cria uma estrutura de dados com espaço para cinco elementos, como representado na figura 4.8 e é inserido nesta um elemento na cauda. Depois de quatro iterações, ou seja, depois de mais quatro valores inseridos, a estrutura fica com todas as posições ocupadas. Na próxima iteração, o primeiro elemento é removido pela cabeça e entra o sexto elemento pela cauda.

Para as cartas de valores individuais e amplitude móvel, foi utilizada esta estrutura, num total de 25 posições.

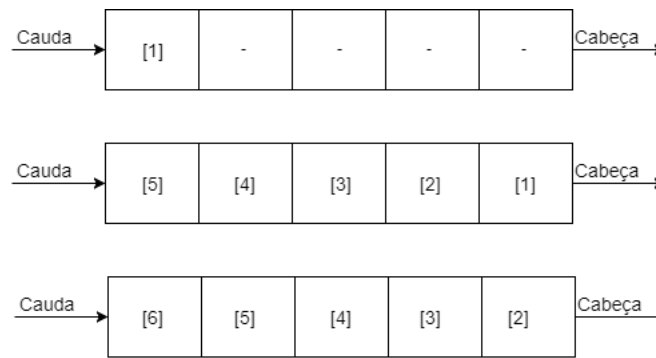


Figura 4.8: Exemplo de estrutura de dados FIFO

Ou seja, a cada iteração, i.e, a cada valor recebido do parâmetro a ser mensurado, o primeiro elemento presente na estrutura é removido pela cabeça e entra outro novo pela cauda. Desta forma, para uma estrutura de 25 elementos, o limite central para a carta dos valores individuais é dado por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{25}}{25} \quad (4.7)$$

E o limite central para a carta das amplitudes móveis é calculado através da seguinte expressão:

$$\overline{MR} = \sum_{i=2}^{25} \frac{MR_i}{25 - 1} \quad (4.8)$$

Os limites superior e inferior para a carta dos valores individuais são calculados a partir de:

$$LSC = \bar{x} + E_2 \cdot \overline{MR} = \bar{x} + 2,660 \cdot \overline{MR} \quad (4.9)$$

$$LIC = \bar{x} - E_2 \cdot \overline{MR} = \bar{x} - 2,660 \cdot \overline{MR} \quad (4.10)$$

Sendo E_2 o valor disponível no anexo F.

Já para os limites superior e inferior para a carta da amplitude móvel, estes são calculados da seguinte forma:

$$LSC = \overline{MR} \cdot 3,267 \quad (4.11)$$

$$LIC = \overline{MR} \cdot 0 = 0 \quad (4.12)$$

Assim sendo, para além dos valores disponíveis da estrutura de dados estar, a cada novo valor, a ser alterada, os valores da média e amplitude variam também, alterando os valores dos limites superior, central e inferior para ambas as cartas.

4.1.3 Implementação

A implementação das cartas de controlo das médias e amplitudes foi inteiramente realizada no programa Excel. Os dados relativos à condutividade elétrica estavam armazenados na base de dados MongoDB mas, através de uma ferramenta disponível desta base de dados, todos os dados foram convertidos da extensão ".json" num ficheiro do tipo ".csv". Este tipo de ficheiro é reconhecido pelo Excel e a informação ficou então disponível nesta plataforma. De seguida, procedeu-se à análise dos dados. Calcularam-se as médias, amplitudes e limites e após esta tarefa estar concluída, procedeu-se à realização das cartas de controlo da qualidade de média e amplitude.

Relativamente às cartas de valores individuais e amplitude móvel, dado o facto de que, como explicado em 3, o programa que recebia os dados vindos do PLC foi realizado na linguagem de programação C#, por simplicidade utilizou-se o mesmo programa para realizar estas cartas, sendo estas representadas de seguida na interface gráfica. Desta forma não foi necessário recorrer a outro tipo de programa ou linguagem.

No caso de haver um ponto que ultrapasse os limites superiores ou inferiores, este fica gravado na base de dados e é prontamente exposto no sistema de monitorização o sensor, máquina e limite ultrapassado. Em título de exemplo, apresenta-se a figura 4.9 onde se pode verificar que o limite superior de controlo numa das cartas foi ultrapassado na máquina de desmineralização e parâmetro condutividade.

Deste modo, para além de ter sido atingido o objetivo de estar a monitorizar, através das cartas de controlo da qualidade, determinada característica, atingiu-se também a meta de tornar as cartas expansíveis para outros parâmetros do tipo variáveis.

Limite superior de controlo ultrapassado na máquina Desmineralização no parâmetro Condutividade elétrica

Figura 4.9: Exemplo de limite de controlo ultrapassado

4.1.4 Resultados

Após as cartas de controlo de média e amplitude terem sido realizadas, é necessário avaliar se o parâmetro mensurado, a condutividade elétrica, se encontrava ou não, numa situação de controlo, querendo com isto dizer que, sendo um parâmetro importante para a máquina de desmineralização, alguma anomalia, ou seja, algum valor fora do controlo, significará uma falha no sistema. No capítulo 2 são enumeradas cinco padrões não naturais que se observam nas cartas de controlo: deslocação, ciclos, tendências, fenómenos e misto. Estes padrões auxiliam na compreensão do estado em que dado sistema se encontra. Na tabela 4.3 está representada a análise para cada padrão não natural das cartas dimensionadas, acrescentando também a saídas dos limites de controlo de algum ponto nas cartas de média e amplitude, onde "N" significa "não" e "S" significa "sim". Pela tabela verifica-se que, nas cartas das amplitudes, o padrão não natural "Fenómenos" deu afirmativo. Tal significa que, nestas cartas, vários valores diferem uns dos outros, apesar de não surgirem pontos fora dos limites de controlo. Este padrão pode-se dever ao facto de possíveis danos acidentais pois, após se consultar, verificou-se que nenhum ajustamento foi feito.

Apesar de se ter verificado um padrão anormal, não é suficiente para considerar que o sistema se encontra fora de controlo, muito pelo contrário. Tanto pela carta das médias como pela carta das amplitudes, verifica-se que o sistema se encontra numa situação de controlo.

Tabela 4.3: Análise de padrões não naturais nas cartas das médias e amplitudes

Padrões	Carta das médias	Carta das amplitudes
Saída dos limites de controlo	N	N
Deslocação	N	N
Ciclos	N	N
Tendências	N	N
Fenómenos	N	S
Misto	N	N

4.2 Extrapolação

As cartas de controlo da qualidade são uma boa ferramenta SPC e o objetivo principal da sua utilização neste trabalho foi monitorizar o processo em tempo real. Até então não foram observadas situações fora do controlo por parte da condutividade elétrica: sendo que o parâmetro mantém valores dentro dos limites de controlo, conclui-se que não será necessário fazer manutenção do equipamento.

A principal questão que não se consegue responder através das cartas de qualidade é, quando, no futuro, terá realmente que se fazer manutenção e quando é que poderão aparecer falhas no

sistema. Estas questões são importantes, e depois de revista a literatura, chegou-se à conclusão que, com os dados fornecidos, ou seja, com os valores da condutividade elétrica, o método mais adequado para se utilizar seria a extrapolação, dado o facto de só se ter conseguido monitorizar um parâmetro e poder-se verificar o seu desenvolvimento temporal.

Há vários tipos de extrapolação (linear, exponencial, logarítmica, polinomial, potencial). Resta portanto, escolher qual o melhor tipo de extrapolação a utilizar, qual a amostra de valores da condutividade elétrica e retirar resultados da análise.

4.2.1 Análise de requisitos

Escolher a amostra de dados a utilizar e o espaçamento entre estes (Δt) é o requisito desta análise de extrapolação, verificando médias, desvios padrão, máximos e mínimos das amostras e cálculos do coeficiente de determinação (R^2).

O coeficiente de determinação é um valor, entre zero e um, que traduz a percentagem de veracidade do modelo criado de extrapolação relativamente aos valores de entrada do modelo.

Para uma primeira análise, como representado na figura 4.10, será escolhido um determinado tempo $n \cdot \Delta t$, cujo valor da condutividade elétrica já se sabe, e utilizando o método escolhido de extrapolação, verifica-se à se esse valor da condutividade elétrica foi corretamente obtido.

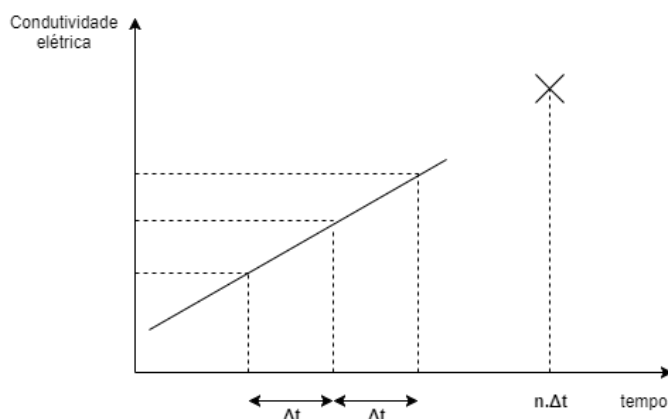


Figura 4.10: Esquema representativo da possível reta de extrapolação linear com o valor no tempo $n \cdot \Delta t$ para ser determinado

4.2.2 Solução proposta

Começou-se então por observar, ao longo do tempo, a evolução da condutividade elétrica e qual o tipo de extrapolação indicado para o problema. Reuniram-se em primeiro lugar, vários valores da condutividade espaçados igualmente durante duas semanas. Foram retirados, por dia, dois valores em cada hora, das nove horas da manhã às seis horas da tarde, dando um total de 18 valores por dia, ou seja, 180 valores da condutividade elétrica para duas semanas de funcionamento da máquina. Dado o facto de o sistema de monitorização estar a receber valores da condutividade elétrica de cinco em cinco segundos, foi utilizado, para cada valor utilizado, o primeiro valor de

cada minuto respetivo. Os dados escolhidos estão disponíveis no anexo G. Na figura 4.11 podem-se visualizar todos os dados graficamente, por hora e na figura 4.12 os valores estão dispostos por data, ou seja, de dia 21 de Junho a dia 2 de Julho. Pode-se verificar pelas duas imagens que os valores da condutividade elétrica são bastante diferentes e, como tal, a aproximação a uma determinada função será complicada.

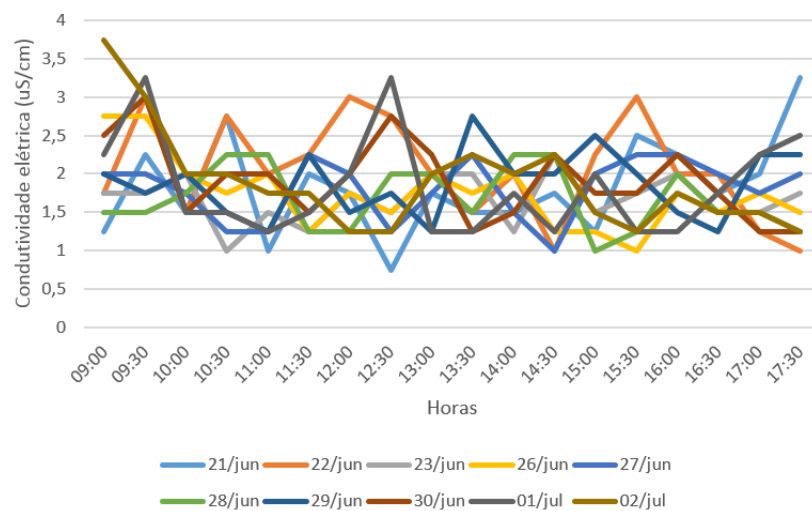


Figura 4.11: Valores da condutividade retirados para as diferentes horas de análise de análise

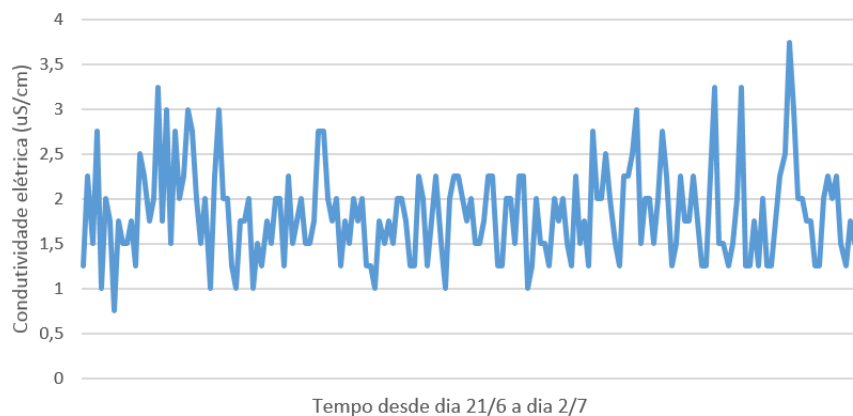


Figura 4.12: Valores da condutividade retirados desde dia 21 de Junho a dia 2 de Junho

Com os dados representados nas figuras anteriores, foram traçadas várias curvas de extrapolação: linear, exponencial, polinomial e potencial. Os resultados estão representados na tabela 4.4 para a equação da curva, da condutividade elétrica em ordem ao tempo e do valor do coeficiente de determinação, R^2 . O tempo, neste caso a variável x está espaçada de meia em meia hora num horário da máquina em funcionamento, das nove horas da manhã às seis horas da tarde. Observando a tabela, verifica-se que o melhor valor, ainda que bastante baixo, do coeficiente de determinação

é o da curva polinomial. Como tal, o tipo de extrapolação prendeu-se no tipo polinomial com a equação:

$$y = 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0019 \cdot x + 1,8865 \quad (4.13)$$

Para uma mais fácil compreensão destes dados, considera-se, no gráfico 4.13 que a variável das abcissas, o tempo, é descrito como um número de amostras. Ou seja, para o primeiro valor recolhido tem-se que $t = 1$, para o segundo $t = 2$ e para o n -ésimo tempo recolhido, $t = n$. Desta forma, observa-se o gráfico 4.13.

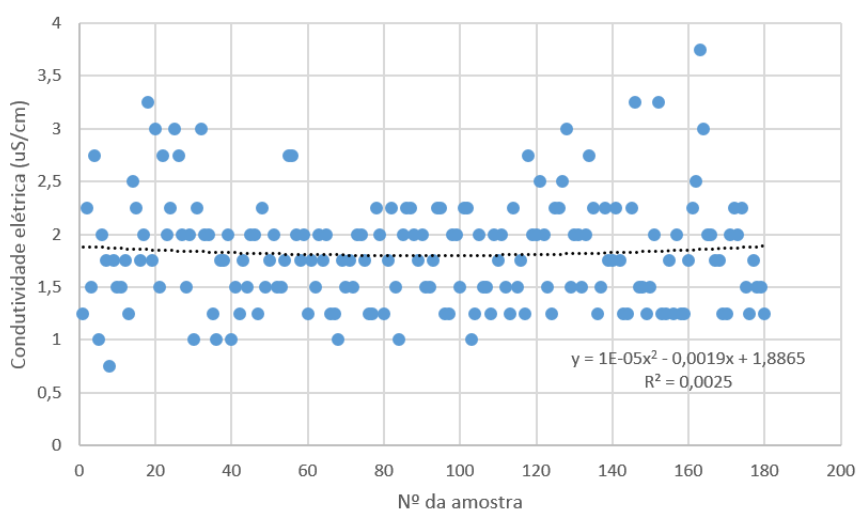


Figura 4.13: Valores da condutividade e curva de tendência polinomial

Tabela 4.4: Equações das curvas de extrapolação e valor do coeficiente de determinação

Tipo de extrapolação	Equação da curva	R^2
linear	$y = 10^{-5} \cdot x + 1,8272$	$1 \cdot 10^{-6}$
exponencial	$y = 1,7487 \cdot e^{5 \cdot 10^{-5} \cdot x}$	$9 \cdot 10^{-5}$
polinomial	$y = 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0019 \cdot x + 1,8865$	0,0025
potencial	$y = 1,7168 \cdot x^{0,0055}$	0,0003

4.2.3 Implementação

Dado o facto de que os valores da condutividade elétrica disponíveis estavam representados no programa Excel, por simplicidade, a implementação para esta análise preditiva de extrapolação foi realizada através deste programa.

Para esta, recolheram-se os valores de condutividade elétrica representados no anexo G. Foram gerados gráficos de dispersão e para estes, verificadas as tendências.

Os valores obtidos das equações presentes na tabela 4.4 foram também obtidos neste *software*, alterando apenas a curva desejada de aproximação, ou seja, linear, exponencial, polinomial ou potencial.

4.2.4 Resultados

Depois de se verificarem as equações das diferentes extrapolações e do coeficiente de determinação, conclui-se que os resultados são algo insatisfatórios. Apesar do sistema de encontrar em controlo, como visto através das cartas de controlo da qualidade, não é de todo fácil criar um modelo preditivo baseado em extrapolação devido à variabilidade dos valores da condutividade elétrica. Ora, se se utilizar a equação polinomial 4.13 para determinar quando é que o sistema se pode encontrar numa situação que requer manutenção, considera-se que a condutividade elétrica é de $20\mu S/cm$. Para este caso tem-se então que $y = 20$. Neste caso, o valor das abcissas n para o qual o valor da condutividade elétrica é de $20\mu S/cm$ é de 1917 (com o valor mais próximo de $y = 19,9931$).

Como o valor n nas abcissas representa meia hora do horário de trabalho, significa então que o número de minutos até este valor será atingido é de $1917 \cdot 30 = 57510$ minutos. Ora, se como definido nesta dissertação, o horário de trabalho for de oito horas diárias, significa que, por dia, a máquina está ligada $8 \cdot 60 = 480$ minutos. Como tal, são precisos $57510/480 \approx 119$ dias de trabalho com a máquina ligada para uma próxima manutenção.

4.2.5 Conclusões

Conclui-se a partir deste capítulo que, através da análise das cartas de controlo de média e amplitude, a máquina de desmineralização se encontra numa situação de controlo. Foram dimensionadas cartas de valores individuais e amplitude móvel que, até então, não revelaram também qualquer anomalia no sistema. Retira-se também deste capítulo que a quantidade de valores da condutividade elétrica retirados num período tão curto de tempo e a falta de outros parâmetros põem em causa uma boa análise preditiva e que, da análise realizada, o método de extrapolação mais coerente será o de extrapolação polinomial.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste trabalho foi proposto a realização de um sistema de monitorização com o objetivo de monitorizar, em tempo real, parâmetros de máquinas. Propôs-se também a realização de um sistema baseado em técnicas estatísticas, denominado sistema de controlo da qualidade. Neste, são utilizadas cartas de controlo da qualidade e um método de extrapolação.

5.1 Satisfação dos Objetivos

Os objetivos para o sistema de monitorização foram a criação de um sistema em tempo real, expansível para outros parâmetros e máquinas, com limites superiores e inferiores para cada parâmetro e com interface gráfica em *web*, sendo mais fácil desta forma utilizar esta aplicação em diferentes máquinas.

Criou-se, portanto, um sistema com a capacidade de definir o período para a receção de dados proveniente das máquinas. Define-se o período com que o PLC recebe informação e a guarda em endereços de memória vinda dos sensores, define-se o período com que o PLC envia informação para a base e dados e, por último, define-se o período com que os dados são mostrados na interface gráfica. Deste modo é possível alterar a cadência com que os dados são apresentados na interface gráfica e também a cadência com que os gráficos do comportamento do parâmetro ao longo do tempo são atualizados.

O sistema de monitorização criado possibilita a inserção de parâmetros e máquinas de forma simples e intuitiva, portanto é facilmente expansível para outras máquinas e parâmetros, bastando conhecer previamente o IP da máquina e os endereços de memória respetivos de cada parâmetro no PLC. Depois de saber esta informação, o sistema está pronto para começar a monitorizar os parâmetros que se quer.

Relativamente aos limites para cada parâmetro, estes são uma medida de prevenção para avaliar o bom funcionamento do parâmetro. Sabendo previamente o comportamento normal dos parâmetros, atribuindo limites superiores e inferiores, sabe-se se estes estão num estado de controlo ou se, por algum motivo, saíram fora do controlo.

Para testar o sistema de monitorização, utilizou-se uma máquina de desmineralização de água e um sensor de condutividade elétrica, que se encontrava na saída da máquina, ou seja, media o grau de desmineralização da água. Depois de se adicionar o parâmetro e a máquina ao sistema, demonstrou-se que o sistema estava funcional, ou seja, os dados estavam corretamente a ser mostrados na interface do sistema, com a cadência pré-definida. Relativamente à máquina, verificou-se que se encontra em bom funcionamento, dado o facto de que os valores retirados da condutividade elétrica mantiveram-se, ao longo do tempo, bastante idênticos, verificando-se um baixo valor de variabilidade. Deste modo, todos os objetivos foram satisfeitos relativamente ao sistema de monitorização.

Em relação ao sistema de controlo da qualidade, realizaram-se em primeiro lugar cartas de média e amplitude que demonstraram estar de acordo com os dados retirados da condutividade elétrica, ou seja, este parâmetro manteve-se numa situação de controlo, podendo-se com isto concluir que o sistema se encontra também em controlo.

Foram realizadas cartas individuais e de média móvel com o intuito de monitorizar, em tempo real, o estado de controlo da condutividade elétrica, de onde se conclui novamente, que esta característica manteve o seu bom funcionamento ao longo do tempo. Estas possibilitam também a expansão para outros parâmetros e máquinas que tenham características variáveis e, no caso de alguma ultrapassagem de algum ponto em relação aos limites superiores e inferiores, estas situações são prontamente mostradas na interface gráfica para os utilizadores do sistema verificarem o grau de controlo do sistema e do parâmetro em questão.

Relativamente à segunda parte do sistema de controlo da qualidade, baseado na extrapolação, este demonstrou ser pouco confiável dado o valor do coeficiente de determinação que foi, para o melhor dos casos, de 0,0025. Ainda assim, mesmo sabendo que a análise foi pouco fidedigna, chegou-se ao resultado de que será necessária manutenção dentro de 119 dias, aproximadamente. O ideal para a utilização da extrapolação seria de ter uma base de dados de condutividade elétrica bem mais vasta, onde se pudessem verificar com mais clareza tendências ao longo do tempo da condutividade elétrica.

5.2 Trabalho Futuro

As cartas de controlo da qualidade individuais e de média móvel foram realizadas num ambiente à parte do sistema de monitorização, querendo-se com isto dizer que, os utilizadores do sistema não conseguem visualizar e analisar as cartas de controlo da qualidade em tempo real. Relativamente ao sistema de monitorização, seria interessante incluir estas cartas no sistema.

Ainda em relação a estas cartas, os alarmes de uma situação fora de controlo foram apenas introduzidos quando algum valor ultrapassa os limites superiores e inferiores. Poder-se-iam utilizar algoritmos para cada padrão não natural de modo a interpretar automaticamente alguma situação de pudesse prejudicar o bom funcionamento de algum sistema.

A monitorização de mais parâmetros da máquina de desmineralização serviria para realizar um sistema preditivo utilizando outras técnicas tais como *Data-Mining*, que dariam resultados mais

consistentes relativamente a possíveis falhas no sistema e degradação de componentes. Apenas com um parâmetro a ser monitorizado, como foi o caso neste trabalho e com pouco tempo de recolha de dados, os algoritmos preditivos nunca serão plausíveis. Será necessário, portanto, mais tempo para recolha de dados.

Referências

- [1] Robert John Klancko. Environmental Instrumentation and Analysis Handbook. *Environmental Practice*, 8(02):068, 2006.
- [2] Purair Carbon Filter Company. Purair Carbon Filter Company. URL: <http://www.carbon-filter.com/index.html>.
- [3] Commonly Used Distribution. páginas 119–171. 2015. URL: <http://isoconsultantpune.com/common-used-distribution-in-quality/>.
- [4] D Stamatis. Six Sigma and Beyond. Em *Six Sigma and Beyond*, páginas 221–249. St. Lucie Press, 2001.
- [5] Douglas C. Montgomery. *Introduction to statistical quality control 7th edition*. Wiley, 7th edição, 2009.
- [6] Faculdade De Ciências. Universidade Nova de Lisboa Controlo Estatístico do Processo. 2010. URL: <http://www.aeportugal.pt/Inicio.asp?Pagina=/Areas/Qualidade/FerramentasQualidadeControlo{%}Menu=MenuQualidade>.
- [7] Ashok Prajapati, James Bechtel, e Subramaniam Ganesan. Journal of Quality in Maintenance Engineering Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(3):384–400, 2012.
- [8] Tables of Constants for Control charts. URL: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/ControlChartConstantsAndFormulae.pdf>.
- [9] Anna Lee, Jeffrey W. Elam, e Seth B. Darling. Membrane materials for water purification: design, development, and application. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2(1):17–42, 2016.
- [10] Shiyong Wang, Jiafu Wan, Di Li, e Chunhua Zhang. Implementing Smart Factory of Industry 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 2016. doi:10.1155/2016/3159805.
- [11] Jay Lee, Edzel Lapira, Behrad Bagheri, e Hung an Kao. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1):38–41, 2013. arXiv:arXiv:1011.1669v3, doi:10.1016/j.mfglet.2013.09.005.
- [12] Anming Hu e Allen Apblett, editores. *Nanotechnology for Water Treatment and Purification*, volume 22 de *Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [13] R A Robinson e R H Stokes. *Electrolyte Solutions: Second Revised Edition*. 2002.

- [14] Alfredo Barbosa Henriques e Jorge Crispim Romão. IFT Press, 2011.
- [15] Francisco Salzedas. Electromagnetismo.
- [16] Narinder Kumar. *Comprehensive Physics XII*. Laxmi Publications, 2003.
- [17] H L FRIEDMAN. ELECTROLYTE SOLUTIONS. *Annual Review of Physical Chemistry*, 12:171–194, 1960.
- [18] High Purity Water Resistivity/ Conductivity Measurement. IC Control:11, 2012.
- [19] John J Barron e Colin Ashton. The Effect of Temperature on Conductivity Measurement. 2005.
- [20] ENViCARE Technologies Pvt. Ltd. Demineralization Water Treatment Plants, DM Water Treatment Plant, Manufacturer. URL: <http://www.envicaresystems.com/demineralization-water-treatment-plants-pune.html>.
- [21] David M Gray, Thornton Associates, Anthony C Bevilacqua, e D Ph. Cation Conductivity Temperature Compensation. *International Water Conference IWC-97-48*, (November):1–12, 1997.
- [22] G.S. Logsdon. *Water Filtration Practices: Including Slow Sand Filters and Precoat Filtration*. American Water Works Association, 2011.
- [23] Harry. Marsh e F. Rodriguez-Reinoso. *Activated carbon*. Elsevier, 2006.
- [24] Jane. Kucera. *Reverse osmosis : industrial processes and applications*. Scrivener Publishing LLC, 2015.
- [25] *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. John Wiley and Sons, 2012.
- [26] John O'M Bockris, Amulya K. N. Reddy, e Maria Gamboa-Aldeco. *Fundamentals of Electrodeics*. Kluwer Academic Publishers, 2011. doi:10.1007/b113922.
- [27] Odva. Quick Start for Vendors Handbook A Guide for EtherNet/IP™ Developers. *Open DeviceNet Vendor Association, Inc. (ODVA)*, 2008.
- [28] Max Felser. 21 Real-Time Ethernet for Automation Applications.
- [29] João Fernandes. *Controlo Estatístico do Processo*. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [30] John S. Oakland. *Statistical process control*. Butterworth-Heinemann, 2008.
- [31] H.C. Thode. *Testing For Normality*. Statistics, textbooks and monographs. Taylor & Francis, 2002.
- [32] M. Harmon. *Normality Testing in Excel - The Excel Statistical Master*. Excel Master Series, 2011.
- [33] J. A. Sarsfield Cabral. Capítulo 5 – cartas de controlo shewhart.
- [34] Harrison M. Wadsworth, Kenneth S. Stephens, e A. Blanton. Godfrey. *Modern methods for quality control and improvement*. Wiley, 2002.

- [35] Miriam Solange Fernandes Caruso Alice Momoyo Sakuma Camila Cardoso de Oliveira, Daniel Granato. Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio. *São Paulo (Estado) Secretaria da Saúde. Coordenadoria de Controle de Doenças. Instituto Adolfo Lutz*, 1, 2013.
- [36] C. Iglesias, J. Sancho, J.I. Piñeiro, J. Martínez, J.J. Pastor, e J. Taboada. Shewhart-type control charts and functional data analysis for water quality analysis based on a global indicator. *Desalination and Water Treatment*, 57(6):2669–2684, feb 2016.
- [37] Luis Angel Garcia-Escudero, Oscar Duque-Perez, Miguel Fernandez-Temprano, e Daniel Morinigo-Sotelo. Robust Detection of Incipient Faults in VSI-Fed Induction Motors Using Quality Control Charts. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3):3076–3085, may 2017.
- [38] Mostafa E. Eissa. Shewhart Control Chart in Microbiological Quality Control of Purified Water and its Use in Quantitative Risk Evaluation. *UK Journal of Pharmaceutical Biosciences*, 4(1), feb 2016.
- [39] V; Venkatesh Vishal; Samsingh R Vimal; Karthik Pragadish Visveshwar, N; Vishal. Application of quality tools in a plastic based production industry to achieve the continuous improvement cycle. 18:61–64, Apr 2017.
- [40] M. Xie, T.N. Goh, e P. Ranjan. Some effective control chart procedures for reliability monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 77(2):143–150, aug 2002. doi:10.1016/S0951-8320(02)00041-8.
- [41] Omar M Elmabrouk e Mariam Azraga. Establishments of Predictive Maintenance Control Limits. páginas 533–539, 2014.
- [42] Silvia Joekes, Marcelo Smrekar, e Andrea F. Righetti. A comparative study of two proposed CCC- r charts for high quality processes and their application to an injection molding process. *Quality Engineering*, 28(4):467–475, oct 2016. doi:10.1080/08982112.2016.1172092.
- [43] C. Richard Cassady, Royce O. Bowden, Leemin Liew, e Edward A. Pohl. Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation. *IIE Transactions*, 32(6):471–478, 2000. doi:10.1023/A:1007693017671.
- [44] Tung Le, Ming Luo, Junhong Zhou, e Hian L. Chan. Predictive maintenance decision using statistical linear regression and kernel methods. Em *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, páginas 1–6. IEEE, sep 2014. doi:10.1109/ETFA.2014.7005357.
- [45] Kevin A. Kaiser e Nagi Z. Gebraeel. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 39(4):840–849, 2009.
- [46] Rui Manuel Esteves Araújo e António José de Pina Martins. Introduction to fault diagnosis.
- [47] Zhiwei Gao, C Cecati, e S X Ding. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques Part I: Fault Diagnosis. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 62(6):3768 – 3774, 2015. doi:10.1109/TIE.2015.2417501.

- [48] Andrew Kusiak e Anoop Verma. A data-mining approach to monitoring wind turbines. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 3(1):150–157, 2012. doi:10.1109/TSTE.2011.2163177.
- [49] Zeyi Huang, Zhengguo Xu, Xiaojie Ke, Wenhai Wang, e Youxian Sun. Remaining useful life prediction for an adaptive skew-Wiener process model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87:294–306, 2017. doi:10.1016/j.ymssp.2016.10.027.
- [50] Ahmed Raza e Vladimir Ulansky. Modelling of Predictive Maintenance for a Periodically Inspected System. *Procedia CIRP*, 59:95–101, 2017. doi:10.1016/j.procir.2016.09.032.
- [51] Bo Ding e Huajing Fang. Fault prediction for nonlinear stochastic system with incipient faults based on particle filter and nonlinear regression. *ISA Transactions*, 2017. doi:10.1016/j.isatra.2017.03.018.
- [52] Failure trends in a large disk drive population. *Proceedings of the 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007)*, (February):17–29, 2007. doi:10.1016/j.engfailanal.2005.10.010.
- [53] A. Zayezdny, S. Tiunov, e A. Bronstein. Extrapolation of real-time processes by their structural properties. *Signal Processing*, 38(2):231–237, jul 1994. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0165168494901422>, doi:10.1016/0165-1684(94)90142-2.
- [54] Peter G Bishop. Estimating Residual Faults from Code Coverage. *LNCS*, 2434:163–174, 2002.
- [55] B. Jawerth e M. Milman. *Extrapolation Theory with Applications*. Número n.º 438-440 em American Mathematical Society: Memoirs of the American Mathematical Society. American Mathematical Society, 1991.
- [56] J.D. Kalbfleisch e R.L. Prentice. *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 2011.
- [57] V.N. Joaquim. *Estatística descritiva : Instrumento de decisão*:. Chambel Multimedia, 2015.
- [58] Amos Q. Haviv. *MEAN web development : master real-time web application development using a mean combination of MongoDB, Express, AngularJS, and Node.js*. 2014.
- [59] D. Paniz. *NoSQL: Como armazenar os dados de uma aplicação moderna*. Casa do Código, 2016.
- [60] K. Chodorow. *MongoDB: The Definitive Guide: Powerful and Scalable Data Storage*. O'Reilly Media, 2013.
- [61] MIT - Massachusetts Institute of Technology. URL: <http://web.mit.edu/>.

Anexo A

Sensor de condutividade elétrica

CM-230 (330) X Series Intelligent Conductivity Meter

Performance features

CM-230(330)X series intelligent on-line conductivity meter, it is the upgrade substitute meter of CM230、CM-230SX、330、240、340.

It has keyboard setting electrode constant, high、low limit alarm, transferable 4~20mA current signal output, checking the media temperature、 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and ppm (TDS) conversion through

the switching keys, automatic range conversion, three types of constant to be chosen (0.1cm^{-1} 、 1.0cm^{-1} 、 10.0cm^{-1}), larger measurement range.

It has ultra steady measurement collecting, large temperature range、low excursion design, can switch conductivity/ temperature/TDS under the measurement condition, can give an alarm when the water quality is over standard, high brightness back-light LCD display.

It is used for on-line monitoring and controlling of reverse osmosis、electrodialysis、ion exchange producing water system、cooling water control system and industrial water..



Model and performance function:

Function/model	Non-isolated 4mA signal output	Automatic measurement range	Hi-limited alarm setting	Hi/Lo limited alarm setting	Units of the measurement	Probe Constant
CM-230A	●	●			●	●
CM-230C		●	●		●	●
CM-230D		●	●	●	●	●
CM-330C		●	●		●	●

Main technical specification:

Measurement range :

Conductivity: 0~19.99 0~199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.1cm-1 electrode)

0~19.99 0~199.9、0~1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1.0 cm-1 electrode)

0~199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 0~1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 0~19.99mS/cm (10cm-1 electrode)

Temperature: 0-50 $^{\circ}\text{C}$

Auxiliary electrode:

1.00cm $^{-1}$ plastic platinum gold electrode, 1/2" (1/2 inch) pipe screw connection;

1.00cm $^{-1}$ stainless steel electrode, 1/2" (1/2 inch) pipe screw connection;

Figura A.1: Datasheet do sensor de condutividade elétrica (primeira página)

10.0 cm⁻¹ Teflon platinum electrode, 3/4" (3/4 inch) pipe screw connection;
 The length of the cable: 5m as ex work standard figure or according to the user's specification;
 Medium pressure: 0~0.5MPa;
 Medium temperature: 0~50°C;
 Component of temperature compensation: NTC;
 Display mode: conductivity:3.5-bits LCD Digit display, temperature: 3- bits Digit display;
 Accuracy: 1.5%(FS)
 Stability: $\pm 2 \times 10^{-3}$ (FS) /24h;
 Temperature compensation: Digit calculating compensation, with 25°C as the reference temperature;
 Output signal : non- isolated, transferable 4~20mA current;
 Maximum load impedance :300Ω Max@ DC 9V ;
 Relay load capacity: AC 230V/5A Max (without electromagnetic induction);
 Output control model: ON/OFF two contacts relay output;
 Power supply : AC 220V $\pm 10\%$, 50Hz;
 Power consumption: 2W
 Environment conditions: Temperature: 0~50°C; Humidity: $\leq 85\%RH$;
 Outline dimension: 48×96×100mm(height×width×depth)
 Slot dimension for installation: 45×91mm(height×width)
 Installation: Jam-in



Figura A.2: Datasheet do sensor de condutividade elétrica (segunda página)

Anexo B

Analog input unit

NX-AD

Analog Input Unit (current input type) 8 points NX-AD4203


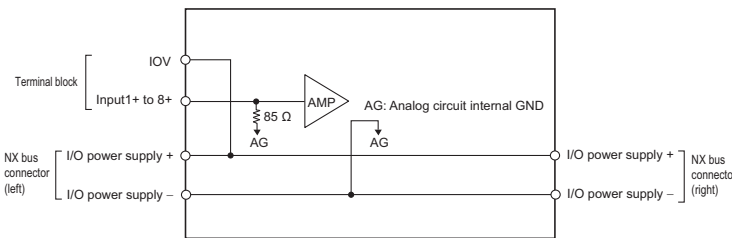
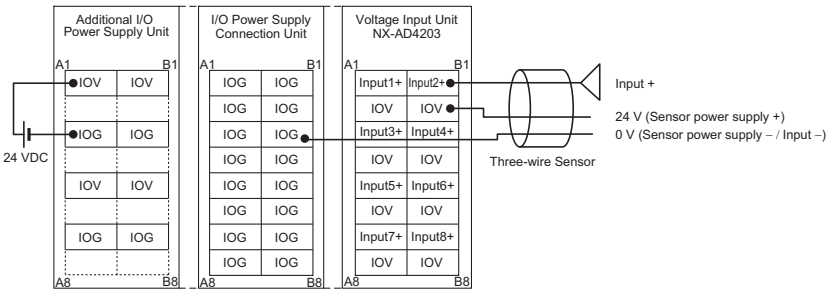
Unit name	Analog Input Unit (current input type)	Model	NX-AD4203
Capacity	8 points	External connection terminals	Screwless clamping terminal block (16 terminals)
I/O refreshing method	Free-Run refreshing		
Indicator	TS indicator 	Input method	Single-ended input
		Input range	4 to 20 mA
		Input conversion range	-5 to 105% (full scale)
		Absolute maximum rating	±30 mA
		Input impedance	85 Ω
		Resolution	1/8000 (full scale)
		Overall accuracy	25°C: ±0.2% (full scale) 0 to 55°C: ±0.4% (full scale)
		Conversion time	250 μs/point
Dimensions	12 (W) x 100 (H) x 71 (D)	Isolation method	Between the input and the NX bus: Power = Transformer, Signal = Digital isolator (no isolation between inputs)
Insulation resistance	20 MΩ min. between isolated circuits (at 100 VDC)	Dielectric strength	510 VAC between isolated circuits for 1 minute at a leakage current of 5 mA max.
I/O power supply method	Supply from the NX bus	Current capacity of I/O power supply terminal	IOV: 0.1 A/terminal max.
NX Unit power consumption	1.05 W max.	I/O current consumption	No consumption
Weight	70 g max.		
Circuit layout			
Installation orientation and restrictions	Installation orientation: Possible in 6 orientations. Restrictions: No restrictions		
Terminal connection diagram			
Input disconnection detection	Supported.		

Figura B.1: Datasheet do analog input unit

Anexo C

Dados da condutividade para a 1ª análise

Dias e valores retirados									
22/jun		26/jun		30/jun		02/jul		04/jul	
8	1,999	7	1,749125	9	2,248875	7	1,749125	7	1,74913
8	1,999	6	1,49925	6	1,49925	9	2,248875	9	2,24888
5	1,249375	6	1,49925	9	2,248875	7	1,749125	6	1,49925
6	1,49925	6	1,49925	9	2,248875	8	1,999	10	2,49875
5	1,249375	6	1,49925	7	1,749125	6	1,49925	10	2,49875
5	1,249375	7	1,749125	5	1,249375	9	2,248875	8	1,999
5	1,249375	5	1,249375	7	1,749125	9	2,248875	10	2,49875
7	1,749125	8	1,999	8	1,999	7	1,749125	8	1,999
4	0,9995	6	1,49925	6	1,49925	9	2,248875	10	2,49875
4	0,9995	8	1,999	7	1,749125	8	1,999	8	1,999
8	1,999	6	1,49925	7	1,749125	6	1,49925	10	2,49875
6	1,49925	5	1,249375	7	1,749125	9	2,248875	9	2,24888
4	0,9995	5	1,249375	7	1,749125	11	2,748625	9	2,24888
8	1,999	5	1,249375	9	2,248875	10	2,49875	9	2,24888
7	1,749125	6	1,49925	10	2,49875	7	1,749125	7	1,74913
5	1,249375	5	1,249375	7	1,749125	8	1,999	9	2,24888
7	1,749125	5	1,249375	5	1,249375	10	2,49875	10	2,49875
6	1,49925	4	0,9995	6	1,49925	7	1,749125	8	1,999
8	1,999	5	1,249375	5	1,249375	9	2,248875	6	1,49925
4	0,9995	7	1,749125	7	1,749125	10	2,49875	6	1,49925

Figura C.1: Dados da condutividade elétrica para a análise das quatro horas da tarde

Anexo D

Dados da condutividade para a 2ª análise

Dias e valores retirados									
22/jun		26/jun		30/jun		02/jul		04/jul	
7	1,749125	11	2,748625	10	2,49875	15	3,748125	12	2,9985
12	2,9985	10	2,49875	9	2,248875	9	2,248875	14	3,49825
11	2,748625	12	2,9985	13	3,248375	13	3,248375	10	2,49875
9	2,248875	10	2,49875	10	2,49875	14	3,49825	12	2,9985
9	2,248875	11	2,748625	10	2,49875	12	2,9985	13	3,24838
9	2,248875	11	2,748625	10	2,49875	11	2,748625	12	2,9985
13	3,248375	13	3,248375	10	2,49875	14	3,49825	14	3,49825
12	2,9985	10	2,49875	10	2,49875	12	2,9985	8	1,999
12	2,9985	12	2,9985	12	2,9985	11	2,748625	11	2,74863
13	3,248375	8	1,999	10	2,49875	11	2,748625	12	2,9985
12	2,9985	11	2,748625	12	2,9985	12	2,9985	13	3,24838
10	2,49875	8	1,999	13	3,248375	10	2,49875	11	2,74863
12	2,9985	11	2,748625	12	2,9985	8	1,999	11	2,74863
9	2,248875	14	3,49825	9	2,248875	13	3,248375	11	2,74863
12	2,9985	12	2,9985	12	2,9985	10	2,49875	9	2,24888
8	1,999	11	2,748625	11	2,748625	13	3,248375	11	2,74863
11	2,748625	11	2,748625	9	2,248875	9	2,248875	15	3,74813
9	2,248875	10	2,49875	14	3,49825	12	2,9985	8	1,999
10	2,49875	8	1,999	10	2,49875	8	1,999	8	1,999
11	2,748625	13	3,248375	13	3,248375	9	2,248875	12	2,9985

Figura D.1: Dados da condutividade elétrica para a análise das nove horas da manhã

Anexo E

Dados da condutividade para a 3ª análise


Dias e valores retirados									
22/jun		26/jun		30/jun		02/jul		04/jul	
12	2,9985	11	2,748625	11	2,748625	10	2,49875	8	1,999
9	2,248875	8	1,999	9	2,248875	9	2,248875	10	2,49875
11	2,748625	11	2,748625	9	2,248875	11	2,748625	10	2,49875
8	1,999	7	1,749125	8	1,999	8	1,999	12	2,9985
11	2,748625	12	2,9985	10	2,49875	11	2,748625	11	2,74863
8	1,999	10	2,49875	8	1,999	10	2,49875	11	2,74863
10	2,49875	12	2,9985	9	2,248875	8	1,999	11	2,74863
12	2,9985	11	2,748625	8	1,999	11	2,748625	9	2,24888
9	2,248875	9	2,248875	11	2,748625	7	1,749125	10	2,49875
11	2,748625	8	1,999	9	2,248875	11	2,748625	8	1,999
9	2,248875	9	2,248875	10	2,49875	9	2,248875	10	2,49875
11	2,748625	11	2,748625	8	1,999	8	1,999	9	2,24888
7	1,749125	10	2,49875	10	2,49875	10	2,49875	10	2,49875
8	1,999	8	1,999	11	2,748625	10	2,49875	9	2,24888
8	1,999	12	2,9985	7	1,749125	11	2,748625	11	2,74863
9	2,248875	11	2,748625	11	2,748625	11	2,748625	9	2,24888
11	2,748625	10	2,49875	8	1,999	8	1,999	8	1,999
8	1,999	12	2,9985	11	2,748625	9	2,248875	10	2,49875
12	2,9985	12	2,9985	8	1,999	8	1,999	8	1,999
8	1,999	11	2,748625	9	2,248875	10	2,49875	8	1,999

Figura E.1: Dados da condutividade elétrica para a análise das seis horas da tarde

Anexo F

Fatores para as cartas de controlo de qualidade


Os fatores para as cartas de controlo da qualidade foram retirados de [61] e são originários da *International Organization for Standardization: ISO 8258 – Shewhart control charts*.



Tables of Constants for Control charts								
Table 8A - Variable Data						ref : AIAG manual for SPC		
X bar and R Charts					X bar and s charts			
Chart for Averages	Chart for Ranges (R)				Chart for Averages	Chart for Standard Deviation (s)		
Control Limits Factor	Divisors to Estimate σ_x	Factors for Control Limits			Control Limits Factor	Divisors to estimate σ_x	Factors for Control Limits	
Subgroup size (n)	A_2	d_2	D_3	D_4	A_3	c_4	B_3	B_4
2	1.880	1.128	-	3.267	2.659	0.7979	-	3.267
3	1.023	1.693	-	2.574	1.954	0.8862	-	2.568
4	0.729	2.059	-	2.282	1.628	0.9213	-	2.266
5	0.577	2.326	-	2.114	1.427	0.9400	-	2.089
6	0.483	2.534	-	2.004	1.287	0.9515	0.030	1.970
7	0.419	2.704	0.076	1.924	1.182	0.9594	0.118	1.882
8	0.373	2.847	0.136	1.864	1.099	0.9650	0.185	1.815
9	0.337	2.970	0.184	1.816	1.032	0.9693	0.239	1.761
10	0.308	3.078	0.223	1.777	0.975	0.9727	0.284	1.716
15	0.223	3.472	0.347	1.653	0.789	0.9823	0.428	1.572
25	0.153	3.931	0.459	1.541	0.606	0.9896	0.565	1.435

Figura F.1: Fatores para as cartas \bar{x} e R e para as cartas \bar{x} e σ . Adaptado de [8]





Institute of
Quality & Reliability

Tables of Constants for Control charts								
Table 8B Variable Data						ref : AIAG manual for SPC		
Median Charts					Charts for Individuals			
Chart for Medians	Chart for Ranges (R)				Chart for Individuals	Chart for Moving Range (R)		
Control Limits Factor	Divisors to Estimate σ_x	Factors for Control Limits		Control Limits Factor	Divisors to Estimate σ_x	Factors for Control Limits		
Subgroup size	\bar{A}_2	d_2	D3	D4	E_2	d_2	D3	D4
2	1.880	1.128	-	3.267	2.660	1.128	-	3.267
3	1.187	1.693	-	2.574	1.772	1.693	-	2.574
4	0.796	2.059	-	2.282	1.457	2.059	-	2.282
5	0.691	2.326	-	2.114	1.290	2.326	-	2.114
6	0.548	2.534	-	2.004	1.184	2.534	-	2.004
7	0.508	2.704	0.076	1.924	1.109	2.704	0.076	1.924
8	0.433	2.847	0.136	1.864	1.054	2.847	0.136	1.864
9	0.412	2.970	0.184	1.816	1.010	2.970	0.184	1.816
10	0.362	3.078	0.223	1.777	0.975	3.078	0.223	1.777

Figura F.2: Fatores para as cartas de mediana e valores individuais e amplitude móvel. Adaptado de [8]

Anexo G

Valores da condutividade elétrica para análise de extrapolação

	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
21/jun	1,2494	2,249	1,4993	2,749	0,9995	1,999	1,7491	0,75	1,7491	1,5	1,49925	1,749	1,24938	2,5	2,24888	1,74913	1,999	3,25
22/jun	1,7491	2,999	1,4993	2,749	1,999	2,249	2,9985	2,749	1,999	1,5	1,999	1	2,24888	3	1,999	1,999	1,249375	1
23/jun	1,7491	1,749	1,999	1	1,49925	1,249	1,7491	1,499	1,999	2	1,24938	2,249	1,49925	1,75	1,999	1,49925	1,49925	1,75
26/jun	2,7486	2,749	1,999	1,749	1,999	1,249	1,7491	1,499	1,999	1,75	1,999	1,249	1,24938	1	1,74913	1,49925	1,749125	1,5
27/jun	1,999	1,999	1,7491	1,249	1,24938	2,249	1,999	1,249	1,7491	2,25	1,49925	1	1,999	2,25	2,24888	1,999	1,749125	2
28/jun	1,4993	1,499	1,7491	2,249	2,24888	1,249	1,2494	1,999	1,999	1,5	2,24888	2,249	0,9995	1,25	1,999	1,49925	1,49925	1,25
29/jun	1,999	1,749	1,999	1,499	1,24938	2,249	1,4993	1,749	1,2494	2,75	1,999	1,999	2,49875	2	1,49925	1,24938	2,248875	2,25
30/jun	2,4988	2,999	1,4993	1,999	1,999	1,499	1,999	2,749	2,2489	1,25	1,49925	2,249	1,74913	1,75	2,24888	1,74913	1,249375	1,25
01/jul	2,2489	3,248	1,4993	1,499	1,24938	1,499	1,999	3,248	1,2494	1,25	1,74913	1,249	1,999	1,25	1,24938	1,74913	2,248875	2,5
02/jul	3,7481	2,999	1,999	1,999	1,74913	1,749	1,2494	1,249	1,999	2,25	1,999	2,249	1,49925	1,25	1,74913	1,49925	1,49925	1,25

Figura G.1: Valores da condutividade elétrica para os dias e horas de análise